

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Studium optických vlnovodů z polydimetylsiloxanu
Study of Optical Waveguides Made from PDMS

2015

Bc. Martin Novák

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Martin Novák**
Studijní program: **N2647 Informační a komunikační technologie**
Studijní obor: **2601T013 Telekomunikační technika**
Téma: **Studium optických vlnovodů z polydimetylsiloxanu**
Study of Optical Waveguides Made from PDMS

Zásady pro vypracování:

Cílem práce je zvládnutí technologických postupů realizace optických a vláknově optických prvků z PDMS. Cíle práce jsou následující:

1. Popis optických a elektrických vlastností PDMS.
2. Specifikace dob vytváření a teploty ve vztahu na hmotnost vzorků a jejich rozměry.
3. Příprava základních optických prvků.
4. Měření útlumu realizovaných prvků a jeho spektrální závislosti.

Seznam doporučené odborné literatury:


Podle pokynů vedoucího diplomové práce

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.**

Datum zadání: 01.09.2014

Datum odevzdání: 07.05.2015


doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry

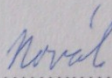



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 23. dubna 2015


.....
podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu práce panu prof. RNDr. Vladimíru Vašinkovi, CSc. za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této diplomové práce.

Abstrakt

Hlavní náplní této diplomové práce je zvládnutí technologických postupů realizace optických a vláknově optických prvků z polydimetylsiloxanu (PDMS).

Praktickou částí práce je za pomoci PDMS sestavení základních optických prvků - válcových vlnovodů, na kterých bylo dále realizováno měření útlumu v závislosti na délce vlnovodu a spektrální závislost jednotlivých vzorků za pomoci mechanické stavebnice ThorLabs a LED zdroje záření. Dalším krokem bylo otestování a následné popsání specifikace dob vytvrzování a teploty ve vztahu na hmotnost vzorků a jejich rozměry. Práce obsahuje teoretické základy potřebné k pochopení optických a elektrických vlastností PDMS.

Klíčová slova

Polydimetylsiloxan, PDMS, Silikonový gel, Sylgard, Válcový vlnovod, Vytvrzení

Abstract

The main contents of this thesis is to master the technological processes realization of optical fiber and optical elements of polydimethylsiloxane (PDMS).

The practical part is for PDMS help build basic optical elements - cylindrical waveguide, where it was further realized by measuring the attenuation depending on the length of the waveguide and the spectral dependence of the individual samples with the help of a mechanical kit Thorlabs and LED light sources. The next step was to test and subsequent description of the specification curing times and temperatures relative to the weight of the samples and their dimensions. Work includes theoretical foundations needed to understand the optical and electrical properties of PDMS.

Key words

Polydimethylsiloxane, PDMS, Silicone gel, Sylgard, Cylindrical waveguide, Curing

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
A	dB	Útlum
a	dB · km ⁻¹	Měrný útlum
L	km	Délka vlákna
E	V · m ⁻¹	Dielektrická pevnost
N	-	Počet módů
n₁	-	Index lomu jádra
n₂	-	Index lomu pláště
P_{Vst}	W	Vstupní výkon
P_{Výst}	W	Výstupní výkon
r	m	Poloměr jádra
V	-	Normalizovaná frekvence
θ_{c1}	°	Mezní úhel na rozhraní jádra a pláště
θ_a	°	Úhel navázání
α_c	°	Mezní úhel šíření
λ	nm	Vlnová délka
π	3,14	Konstanta pí
ε	-	Relativní permitivita
δ	-	Ztrátový součinitel
ζ	Ω · m ⁻¹	Rezistivita

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Význam
ATM	Asynchronous Transfer Mode - Standart pro vysokorychlostní síťovou architekturu
DSI-MC-POF	Multiple Cores Double Step Index-Polymer Optical Fiber - Vícejádrové polymerové optické vlákno s dvojitým skokovým indexem lomu
DSI-POF	Double Step Index-Polymer Optical Fiber - Polymerové optické vlákno s dvojitým skokovým indexem lomu
GI	Graded Index - Gradientní index lomu
GI-POF	Graded Index - Polymer Optical Fiber - Polymerové optické vlákno s plynulou změnou indexu lomu
IR	Infrared - Infračervené záření
LAN	Local Area Network - Lokální síť
LED	Light Emitting Diode - Dioda emitující světlo
MC-SI-POF	Multiple Cores Step Index-Polymer Optical Fiber - Vícejádrové polymerové optické vlákno se skokovým indexem lomu
MSI-POF	Multicore Step Index-Polymer Optical Fiber - Polymerové optické vlákno s vícenásobným skokovým indexem lomu
NA	Numerical Aperture - Numerická apertura
Low-NA-POF	Low-Numerical Aperture-Polymer Optical Fiber - Polymerové optické vlákno se sníženou hodnotou numerické apertury
PC	Polycarbonate - Polykarbonát
PDMS	Polydimethylsiloxane - Polydimetylsiloxan
PMMA	Polymethylmethacrylate - Polymethylmetakrylát
POF	Polymer Optical Fiber - Polymerové optické vlákno
PS	Polystyrene - Polystyren
Semi-GI-POF	Semi Gradient Index-Polymer Optical Fiber - Polymerové optické vlákno s částečně odstupňovaným indexem lomu
SI	Step Index - Skokový index lomu

SI-POF	Step Index - Polymer Optical Fiber - Polymerové optické vlákno se skokovou změnou indexu lomu
SNR	Signal to Noise Ratio - Odstup signálu od šumu

Obsah

Úvod.....	- 12 -
1 Optické vlákno.....	- 13 -
1.1 Princip šíření světla optickým vláknem	- 14 -
1.2 Typy optických vláken	- 15 -
1.3 Vidy (módy) optických vláken.....	- 16 -
1.4 Útlum optických vláken	- 17 -
1.4.1 Absorpce.....	- 17 -
1.4.2 Lineární rozptyl	- 18 -
1.4.3 Nelineární rozptyl.....	- 19 -
1.4.4 Ohybové ztráty	- 19 -
1.4.5 Disperze.....	- 19 -
1.5 Přenosová okna optických vláken	- 20 -
2 Polymerová optická vlákna	- 21 -
2.1 Typy polymerových vláken.....	- 22 -
2.1.1 SI-POF	- 22 -
2.1.2 Low-NA-POF	- 22 -
2.1.3 DSI-POF	- 23 -
2.1.4 MC-SI-POF	- 23 -
2.1.5 DSI-MC-POF	- 24 -
2.1.6 GI-POF	- 25 -
2.1.7 MSI-POF	- 26 -
2.1.8 Semi-GI-POF.....	- 26 -
2.2 Přenosová okna polymerových optických vláken	- 27 -
3 Polydimetylsiloxan	- 28 -
3.1 Úvod.....	- 28 -
3.2 Sylgard	- 29 -
3.2.1 Sylgard 182 a 184.....	- 29 -
3.2.2 Sylgard 170.....	- 29 -
3.2.3 Sylgard 517.....	- 29 -

3.3	Vlastnosti polydimetylsiloxanu.....	- 30 -
3.3.1	Typické a mechanické vlastnosti.....	- 30 -
3.3.2	Elektrické vlastnosti	- 31 -
3.3.3	Optické vlastnosti	- 32 -
3.4	Aplikace polydimetylsiloxanu.....	- 32 -
4	Praktická část	- 34 -
4.1	Úvod.....	- 34 -
4.2	Specifikace dob vytvrzování a teploty ve vztahu na hmotnost vzorků a jejich rozměry.....	- 36 -
4.3	Výroba válcového vlnovodu	- 37 -
4.3.1	Výroba válcového vlnovodu pomocí tažení.....	- 38 -
4.3.2	Výroba válcového vlnovodu pomocí kapiláry.....	- 39 -
4.4	Popis měřicího pracoviště	- 44 -
4.4.1	Stavebnice Thorlabs	- 44 -
4.4.2	Elektronické prvky	- 45 -
4.4.3	Použité zdroje elektromagnetického záření.....	- 46 -
4.4.4	Kompletní schéma zapojení	- 47 -
4.5	Měření útlumu	- 48 -
4.5.1	Označení vytvořených vlnovodů.....	- 48 -
4.5.2	Metodika měření.....	- 48 -
4.5.3	Zpracování výsledků a výpočtů.....	- 49 -
4.5.4	Spektrální závislost vzorku č. 1	- 50 -
4.5.5	Spektrální závislost vzorku č. 2.....	- 52 -
4.5.6	Spektrální závislost vzorku č. 3.....	- 53 -
4.5.7	Spektrální závislost vzorku č. 4.....	- 55 -
4.5.8	Spektrální závislost vzorku č. 5.....	- 56 -
4.6	Výsledná spektrální závislost útlumu.....	- 58 -
	Závěr.....	- 59 -
	Použitá literatura	- 61 -
	Seznam příloh	- 63 -

Úvod

Problematickou přenosu informací pomocí optických kabelů se vědci zabývají již řadu let. Pokud se podíváme do minulosti, tak první pokus o přenos dat pomocí optických vláken uskutečnil již v roce 1930 pan Heinrich Lammse. Od té doby došlo k velkému pokroku až k dnešním optickým vláknům a kabelům sloužícím pro přenos informací, kde základním materiálem je dnes oxid křemičitý (SiO_2) vykazující skvělé optické vlastnosti a pracující s účinností 99,9%.

Cílem této diplomové práce je otestovat pro dnešní dobu víceméně neznámý materiál polydimetylsiloxan (dále PDMS) a vytvořit základní optické prvky - testovací válcové vlnovody, na kterých bylo dále realizováno měření útlumu v závislosti na délce vlnovodu a poté sestavena spektrální závislost jednotlivých vzorků za pomoci mechanické stavebnice ThorLabs a LED zdroje záření.

Z pohledu elektrických vlastností se PDMS chová jako izolant a proto se využívá na zalévání desek plošných spojů, televizních transformátorů, relé atd. Z pohledu tepelných vlastností dokáže při krátkodobé teplotní námaze vydržet až 350°C , při mechanické námaze je po vytvrzení velmi ohebný a pružný. Nejdůležitější pro tuto práci se ovšem jeví optické vlastnosti jako index lomu $n = 1,41$, který s rostoucí vlnovou délkou klesá až k hodnotě 1,39 či propustnost světla ve viditelném spektru, která činí 96%. Doposud se jeho optické vlastnosti využívají v oblasti medicíny a to konkrétně na výrobu kontaktních čoček.

V teoretickém úvodu diplomové práce jsem se tedy nejdříve zaměřil na popsání základních principů a jevů, na kterých je založen samotný přenos světla optickým vlnovodem a dále vybranému pojmu měrný útlum, se kterým dále pracuji v praktické části této práce. Následně jsou v další kapitole blíže popsána polymerová vlákna, která jsou svými vlastnostmi a složením velmi blízko materiálu PDMS. V závěrečných částech teoretické části se věnuji popisu samotnému PDMS v kombinaci s vytvrzovacím činidlem (přípravek Sylgard), využívaným typům dle chemického složení a viskozity, popisují zde mechanické, elektrické a optické vlastnosti a jeho využití v možných komerčních aplikacích.

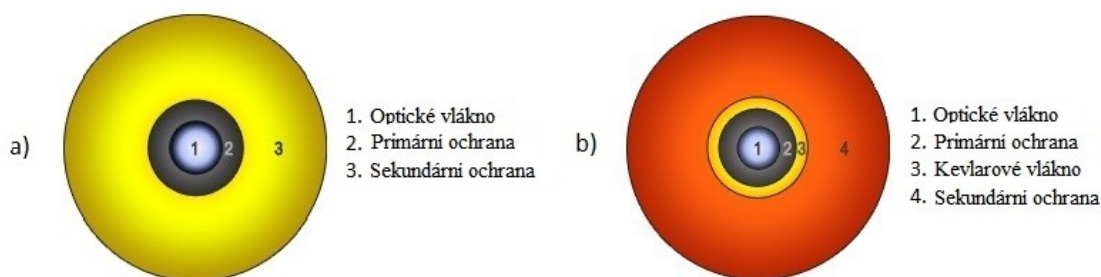
V rámci praktické části jsem se v úvodu zaměřil na otestování a následné popsání specifikace dob vytvrzování a teploty ve vztahu na hmotnost vzorků a jejich rozměrech. Poté pomocí metody leptání kapilár došlo k vytvoření samotných testovacích válcových vlnovodů.

Posledním krokem bylo sestavení měřicího pracoviště a s pomocí LED zdroje záření a jednotlivých vzorků měření vstupního a výstupního výkonu. Na základě těchto naměřených hodnot spočtení měrného útlumu a poté sestavení grafů spektrální závislosti jednotlivých vzorků. Využíval jsem zde 5mm LED (celkem 6 barev) diody v rozsahu vlnových délek 400-624nm a jednu IR diodu s vlnovou délkou 880nm. Každý vzorek byl testován všemi LED diodami v 10krát opakovaném měření. Výsledná spektrální závislost útlumu je dána aritmetickým průměrem všech vypočtených hodnot útlumu pro dílčí vzorky a vlnové délky.

1 Optické vlákno

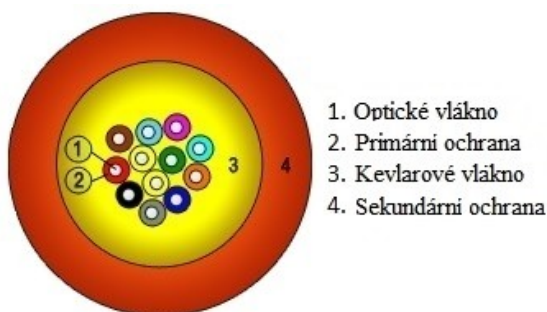
Optické vlákno je dielektrický válcový vlnovod, který je zhotoven z nízkoztrátového materiálu většinou z křemenného, chalkogeného nebo halogenidového skla, popřípadě z některých krystalických polovodičů a polymerů. Optické vlákno je potaženo primární a sekundární ochranou a tvoří tak jednovláknový optický kabel (Obr 1.1a). Ten může být doplněn o kevlarové vlákno, které výrazně zvýší pevnost optického vlákna v tahu (Obr 1.1b). [1][2]

Primární ochrana v podobě akrylátového gelu chrání vlákno před vlhkostí a zvyšuje celkovou pevnost. Sekundární ochrana optického vlákna bývá nejčastěji vyrobena z PVC a přispívá ke zlepšení ohebnosti vlákna. Jednovláknové kabely se v praxi využívají jako patchcordy. [2]



Obrázek 1.1: *Uspořádání jednovláknového optického kabelu*

Pro páteřní rozvody v budovách se používají vícevláknové optické kabely, u kterých je každé optické vlákno zvlášť potaženo primární ochranou (Obr 1.2). Sekundární ochrana je nehořlavá a odolná vůči vlhkosti, korozi a UV záření. Počet optických vláken v kabelu může být 4,6,8,12,16 nebo 24. [2]

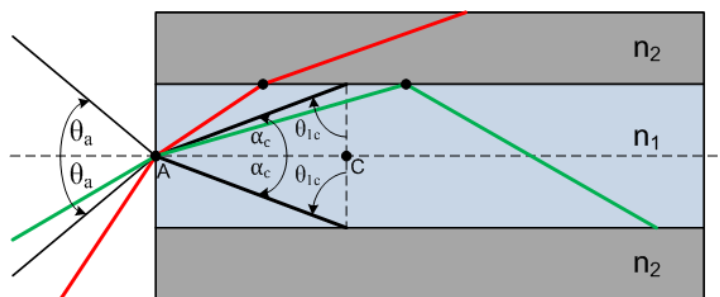


Obrázek 1.2: *Uspořádání vícevláknového optického kabelu*

1.1 Princip šíření světla optickým vláknem

Světlo se šíří optickým vláknem pomocí odrazů, které vznikají na rozhraní dvou prostředí s rozdílnou hodnotou indexu lomu, v našem případě se jedná o jádro s indexem lomu n_1 a plášť s indexem lomu n_2 . Index lomu jádra musí být vždy větší než index lomu pláště a světlo musí dopadat vzhledem ke kolmici rozhraní pod větším úhlem, než je kritický (mezní úhel šíření na rozhraní jádra a pláště) úhel θ_{c1} . Pokud bude úhel dopadu paprsku dostatečně velký, dojde k totálnímu odrazu na rozhraní jádro-plášť. Pokud bude úhel příliš malý, dojde k vyvázání světla ven z jádra, což povede ke ztrátě výkonu. Mezní úhel α_c vymezuje oblast pro vedené paprsky (Obr 1.3). [3]

Aby mohl být paprsek přenášen optickým vláknem, musí do něj vstupovat pod určitým úhlem. Tzv. numerická apertura definuje největší možný vstupní úhel (θ_a), pod kterým může světelný paprsek vstupovat do optického vlákna (Obr 1.3). Světelný paprsek dopadající pod větším úhlem bude vyvázán do pláště. [4]



Obrázek 1.3: *Princip šíření světla optickým vláknem*

Mezní úhel šíření:

$$\alpha_c = \arcsin \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2} \quad (1.1 - 1)$$

Vstupní úhel:

$$\sin(\theta_a) = n_1 \cdot \sin(\alpha_c) \quad (1.1 - 2)$$

Numerická apertura:

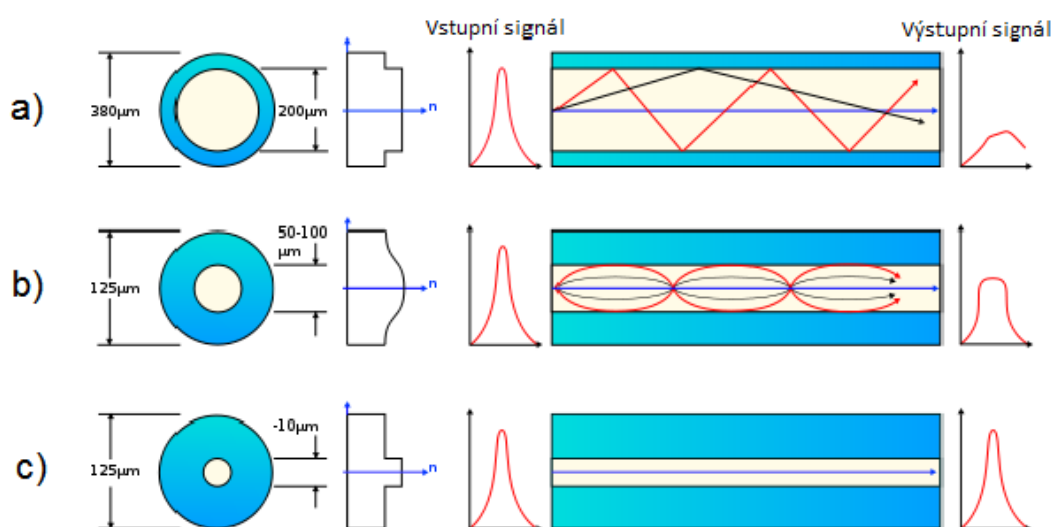
$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1.1 - 3)$$

1.2 Typy optických vláken

V optickém vlákně se optický signál, který je nesen jednotlivými vidy, šíří různými způsoby. Způsob šíření závisí na průměru jádra a na průběhu indexu lomu jádra a pláště. Dle způsobu šíření rozlišujeme tři základní typy optických vláken.

Základní typy optických vláken:

- Jednovidové optické vlákno
- Mnohovidové optické vlákno se skokovou změnou indexu lomu
- Gradientní optické vlákno s pozvolnou změnou indexu lomu



Obrázek 1.4: Základní typy optických vláken

U jednovidového vlákna se vedený vid šíří vláknem ve směru osy bez odrazů, protože poměr indexu lomu jádra a pláště je velmi malý (Obr 1.4c). U těchto typů vláken se průměry jádra pohybují mezi 4-10 μm v závislosti na vlnové délce. Čím vyšší je vlnová délka světelného záření, tím větší je i průměr jádra (pro 1300 nm je potřebný průměr jádra okolo 9 μm a pro vlnovou délku 450 nm dostačuje průměr jádra 5,5 μm). Jednovidová vlákna jsou používána pro přenos informací na velmi dlouhé vzdálenosti. [4]

Zatímco u jednovidových optických vláken se používají výhradně skleněná jádra, u mnohovidových se může využít i některých druhů polymerů. Průměr jádra mnohovidových vláken je výrazně větší než u jednovidových vláken (50-2000 μm), což garantuje menší výrobní cenu a snadnější manipulaci. [4]

Jádro se skokovou změnou indexu lomu:

Pokud je splněn základní předpoklad, že index lomu jádra n_1 a index lomu pláště n_2 mají konstantní velikost, potom na rozhraní jádra a pláště dochází k ostrému lomu vedeného paprsku (Obr 1.4a). Mnohovidovým vláknem se jednotlivé paprsky šíří po různých drahách, nejkratší dráhu vykoná paprsek o nejnižším vidu (přímý paprsek) a nejdelší dráhu paprsek, který má úhel odrazu na úrovni mezního úhlu. Jelikož každý paprsek vedený ve vlákně má rozdílnou dráhu, nedorazí na konec vlákna ve stejném časovém okamžiku. [4]

Jádro s postupnou změnou indexu lomu (gradientní vlákno):

V tomto druhu vlákna dochází k plynulé změně drah jednotlivých paprsků (Obr 1.4b). V prostředí s nižším indexem lomu se optické záření šíří rychleji a celková doba šíření se jen málo liší od doby šíření přímého paprsku. Nejmenší index lomu se nachází na rozhraní jádro-plášť. [4]

Parametr	Jednovidová	Mnohovidová	Gradientní
Průměr jádra [μm]	4 - 10	50 - 2000	50 - 100
Průměr pláště [μm]	125	125 - 300	125 - 140
Průměr primární ochrany [μm]	250	250	250
Index lomu	1,45 - 1,49	-	-
Měrný útlum [db/km]	0,2 - 0,35	2,6 - 50	0,8 - 10
Numerická apertura - NA	0,08 - 0,15	0,3 - 0,6	0,18 - 0,24
Použitelné vlnové délky [nm]	350 - 1800	850 - 1300	850 - 1300

Tabulka 1.1: Srovnání parametrů křemenných vláken

1.3 Vidy (módy) optických vláken

Vedené módy - splňují podmínku totálního odrazu a proto je veškerá energie vedena jádrem optického vlákna. K vyvázání vedených módů je zapotřebí velkého ohybu vlákna, část energie je dále vedena jádrem vlákna a část je vyvázána z jádra ven. [5]

Vyzařující módy - jsou navázány pod větším úhlem než definuje numerická apertura a paprsek je tak "vyzařen" ven z jádra, přičemž dochází k postupné ztrátě energie. [5]

Tunelující módy - nesplňují podmínku totálního odrazu na rozhraní dvou prostředí. Tunelující módy se stanou nestabilními a jejich energie se "přemisťuje" mezi vedenými a vyzařujícími módy a dochází tak k malé ztrátě energie. [5]

1.4 Útlum optických vláken

Útlum lze definovat jako logaritmické vyjádření podílu optického výkonu P_{Vst} navázaného do optického vlákna a výkonu $P_{Výst}$ vyzářeného na jeho konci (1.4-1). Určuje, kolikrát se zmenší hodnota výstupního výkonu oproti vstupnímu výkonu. Ztráty optického výkonu způsobují pasivní komponenty na optické trase např. samotné optické vlákno, kabelová spojka nebo konektor. V optickém vlákně probíhá celá řada fyzikálních jevů, které výrazně ovlivňují velikost útlumu trasy (absorpce, lineární a nelineární rozptyl, ohyb vlákna). Útlum je kmitočtově závislá veličina. [6][7]

$$A(\lambda) = 10 \cdot \log \frac{P_{Výst}}{P_{Vst}} \quad (1.4 - 1)$$

V telekomunikační technice se většinou setkáváme s pojmem měrný útlum. Je to útlum, který je vztažen na jednotku délky (typicky 1km, 100m, 1m nebo 1cm). Definiční vztah pro výpočet měrného útlumu zobrazuje rovnice (1.4-2). [8]

$$a(\lambda) = \frac{A(\text{dB})}{L} = -\frac{1}{L} \cdot \log \frac{P_{Výst}}{P_{Vst}} \quad (1.4 - 2)$$

1.4.1 Absorpce

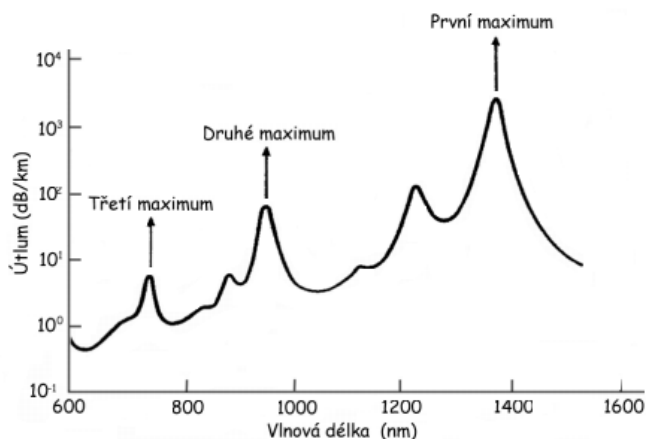
U tohoto jevu dochází k přeměně elektromagnetické energie na energii tepelnou.

- *Vlastní absorpce* - do této skupiny patří absorpce v infračervené oblasti, ultrafialové oblasti a absorpce způsobená vlastním materiálem. Absorpci způsobují v ultrafialové oblasti valenční elektrony a v infračervené oblasti kmitající molekulové útvary. [5]

Materiál	Vlnová délka maxima absorpce [μm]
Si-O	9,2
P-O	8,1
B-O	7,2
Ge-O	11

Tabulka 1.2: *Infračervená absorpce různých materiálů*

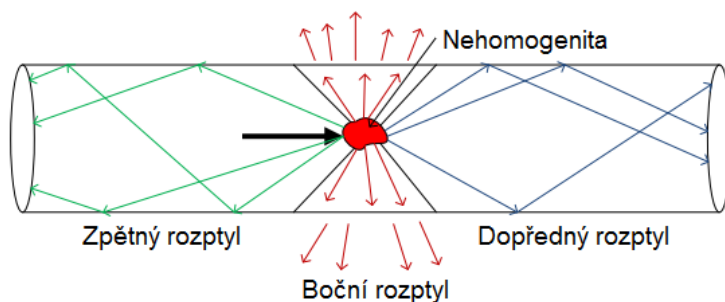
- *Příměšová absorpce* - je způsobena volnými molekulami látek v optickém vlákně (vodní ionty OH). V optickém vlákně vznikají mikrotrhliny, které naruší celistvost vlákna. Rezonanční kmitočet OH iontů leží mimo pásmo používané pro přenos a odpovídá vlnové délce 2,8 μ m. Druhá (1,38 μ m) a třetí (0,94 μ m) harmonická již spadají do oblasti využívaného pásma. [7] [9]



Obrázek 1.5: Závislost útlumu OH iontu

1.4.2 Lineární rozptyl

Lineární rozptyl způsobují nečistoty a nehomogenity ve vlákně, které vznikají při výrobě. Po dopadu světelného paprsku na "překážku" se sice nemění vlnová délka záření, ale mění se trajektorie paprsku a dochází k poklesu výkonu. [10]



Obrázek 1.6: Lineární rozptyl

- *Rayleighův rozptyl* - tepelné kmity krystalické mřížky způsobí tzv. Rayleighův rozptyl. Jedná se o dominující jev v optických komunikacích, který lze částečně eliminovat posunutím pracovní frekvence do infračervené oblasti. [5]

- *Mieův rozptyl* - jeho vznik způsobují mikroskopické bublinky v optickém vlákne, napětí ve vlákne, kolísání průměru jádra, nedokonalá cylindrická struktura a nečistoty ve vlákne. Nehomogenity mají srovnatelnou vlnovou délku s použitým zdrojem světelného záření. [5]
- *Rozptyl na nečistotách* - vzniklé nehomogenity jsou větší než vlnová délka světla. Tento druh rozptylu lze odstranit vhodnou technologií výroby. [5]

1.4.3 Nelineární rozptyl

Fyzikální jev, při němž dochází k rozptylu světelné vlny srážkami a akusticky nebo tepelně kmitajícími atomy optického vlákna. Dochází k posuvu vlnových délek k vyšším hodnotám a poklesu výkonu. [10]

- *Brilloinův rozptyl* - tento typ rozptylu je vyvolán podélnou akustickou vlnou vzniklou elektrostrikcí (vlna je spektrálně posunuta o 10GHz). Jeho velikost je dána úhlem rozptylu. Jev lze potlačit rozšířením spektra signálu. [9]
- *Ramanův rozptyl* - dochází k vzájemné interakci světla šířícího se v určitém prostředí s tímto prostředím, důsledkem je frekvenční posuv. [9]

1.4.4 Ohybové ztráty

Při ohybu optického vlákna dochází ke změně úhlu šíření a dochází tak k porušení podmínky totálního odrazu. Vlivem mechanické deformace vzniká na vnitřní straně ohybu vlákna tlak a na vnější tahové napětí, dochází tak ke změně indexů lomu v jádře a plášti (fotoelastický jev). Rozlišujeme dva druhy ohybových ztrát. [5]

- *Mikroohyby* - jejich zakřivení je menší než je průměr jádra optického vlákna. Vznikají již při samotné výrobě vlákna nebo působením vnějších vlivů (změna teploty, mechanické pnutí apod.). Část energie je převedena do vidů, které jsou vyzářeny do pláště. [11]
- *Makroohyby* - tyto ztráty vznikají při ohybu optického vlákna, kdy část energie je vyzářena ven z jádra. Velikost útlumu závisí na použité vlnové délce, s vyšší vlnovou délkou roste i útlum vlákna. Snížení útlumu lze docílit změnou vlnových délek nebo používat optické vlákna s velkou hodnotou relativní změny indexu lomu. [12]

1.4.5 Disperze

Disperze je definována jako rozdíl šířky impulzu v polovině výsky na jeho konci a začátku optického vlákna. Tento jev nejvíce ovlivňuje přenosové parametry optických vláken (dochází k rozšíření impulzu na výstupu optického vlákna). U analogových systémů se disperze projevuje zmenšením frekvenční šířky modulačního signálu nosné. [12][13]

- *Módová disperze* - módová, neboli vidová disperze vzniká pouze u mnohovidových optických vláken, ve kterých se šíří více vidů současně. Každý takový vid se ve vlákně šíří unikátně (po různé dráze) a dorazí tak na konec vlákna s různým časovým zpožděním, což má za následek rozšíření impulzu na konci vlákna. [13]
- *Chromatická disperze* - spektrální složky signálu, které mají rozdílné vlnové délky se šíří optickým vláknem různou rychlostí. Některé spektrální složky se při průchodu optickým vláknem začnou zpožďovat a dojde k časovému roztažení impulzu na výstupu vlákna. Roztažený výstupní impuls může zasahovat do vedlejších bitových mezer a dochází tak ke zkreslení přenášené informace. Do chromatické disperze spadá materiálová, vlnovodná a profilová disperze. Materiálová disperze je způsobena závislostí indexu lomu materiálu vlákna na vlnové délce světelného záření. Vlnovodná disperze vychází ze závislosti skupinového zpoždění daného vidu na kmitočtu. S měnícím se kmitočtem se mění tvar podélného pole příslušného vidu. Profilová disperze je způsobena závislostí profilu indexu lomu na vlnové délce záření. [12][13]
- *Polarizační disperze* - jelikož žádné optické vlákno nemá ideální cylindrický tvar a není zcela homogenní, je ve vlákně přítomen tzv. dvojlom. Světlo se tedy šíří vláknem dvěma vidy ve dvou navzájem kolmých rovinách, to má za následek časové rozšíření impulzu a zhoršení přenosových parametrů (především SNR). [12]

1.5 Přenosová okna optických vláken

I. okno (850nm): Do prvního přenosového okna spadá mnohovidové šíření. Jelikož jsou dosahované hodnoty měrného útlumu příliš vysoké, nehodí se pro dálkový přenos a své využití nachází v transportních sítích (levné zdroje záření). [10]

II. okno (1280-1335nm): Druhé okno je plně využitelné pro jednovidový přenos na vlákně. Typické hodnoty měrného útlumu se pohybují těsně pod $0,35\text{dB}\cdot\text{km}^{-1}$. Okno se využívá pouze pro dálkové přenosy. [10]

III. okno (1530-1565nm): V tomto okně se u standardního (křemenného) vlákna nachází minimum měrného útlumu ($0,19\text{--}0,22\text{dB}\cdot\text{km}^{-1}$). Okno se využívá pro dálkové přenosy v globálních a transportních sítích. [10]

IV. okno (1565-1625nm): Čtvrté přenosové okno se nachází těsně za absolutním minimem měrného útlumu, a proto se útlumové parametry od III. okna téměř neliší. [10]

V. okno (1335-1530nm): Spojením II. až V. přenosového okna dojde k vytvoření souvislého přenosového kanálu o šířce pásma 50 THz. [10]

2 Polymerová optická vlákna

Největší předností těchto vláken je jednoduchá montáž a rychlá příprava konektorů v terénu. Jelikož polymerní optická vlákna dosahují velkých hodnot útlumů (desítky až stovky dB), používají se výhradně na krátké vzdálenosti maximálně do 200 m. V posledních letech se ale podařilo vylepšit výrobní technologie a hodnoty útlumu dosahují až $10 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$. Taková hodnota útlumu je již akceptovatelná pro síť typu vlákno do domu. Zároveň se podařilo zvýšit odolnost vůči teplotnímu namáhání ($200\text{--}300^\circ\text{C}$). Pokud by se i nadále podařilo snižovat hodnoty útlumu, jejich nástup by se stal "revolucí" v optických přenosech, protože oproti křemíkovým vláknům mají mnoho výhod, např. lepší mechanické vlastnosti, větší provozní bezpečnost, levnější prvky a snadnější navázání paprsku do vlákna. [9] V dnešní době se POF vyrábí výhradně v mnohovidovém provedení. Polymerní optická vlákna jsou schopna přenášet různé počty vidů, které definuje tzv. V-parametr (2-1). Pokud je tento parametr menší jak 2,405, bude se optickým vláknem přenášet pouze jediný vid. Pro výpočet V-parametru je zapotřebí znát poloměr jádra, numerickou aperturu a vlnovou délku zdroje záření. [14]

$$V = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{\lambda} \cdot \text{NA} \quad (2 - 1)$$

Vztahy pro výpočet počtu vidů s využitím V-parametru:

$$\text{Skokový index lomu (SI):} \quad N \approx \frac{V^2}{2} \quad (2 - 2)$$

$$\text{Gradientní index lomu (GI):} \quad N \approx \frac{V^4}{4} \quad (2 - 3)$$

Typ POF	Profil	NA	Poloměr [μm]	λ[nm]	V-parametr	Počet vidů
SI-POF - Standardní	SI	0,50	490	650	2 368	2 804 369
GI-POF - Evropský	GI	0,17	25	850	31	247
MC-GOF	SI	0,50	27	650	130	8 515
MC37	SI	0,50	65	650	314	49 348
MC-613	SI	0,50	18,5	650	89	3 997

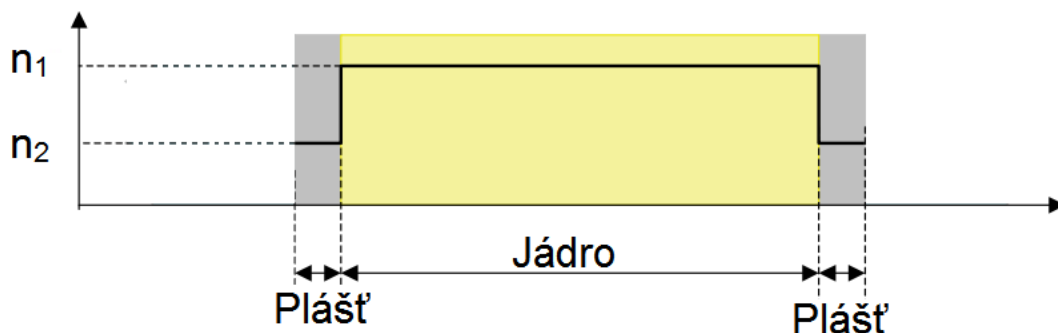
Tabulka 1.3: Parametry vybraných POF

2.1 Typy polymerových vláken

2.1.1 SI-POF

Označením SI-POF se rozumí mnohovidová polymerní optická vlákna se skokovou změnou indexu lomu. Tato vlákna se převážně vyrábí z polymethylmethakrylátu (PMMA) známého také pod názvem plexisklo. Pro výrobu SI-POF se dále využívá materiál polykarbonát (PC) a polystyren (PS). Nevýhodou těchto dvou materiálů je vyšší index lomu (1,58-1,59) oproti polymethylmethakrylátu, který má hodnotu indexu lomu 1,492. Vlákná vyrobená z polyakrylátu se využívají výhradně pro speciální účely, protože pro telekomunikační přenos mají vysoké hodnoty útlumu. [15] [16]

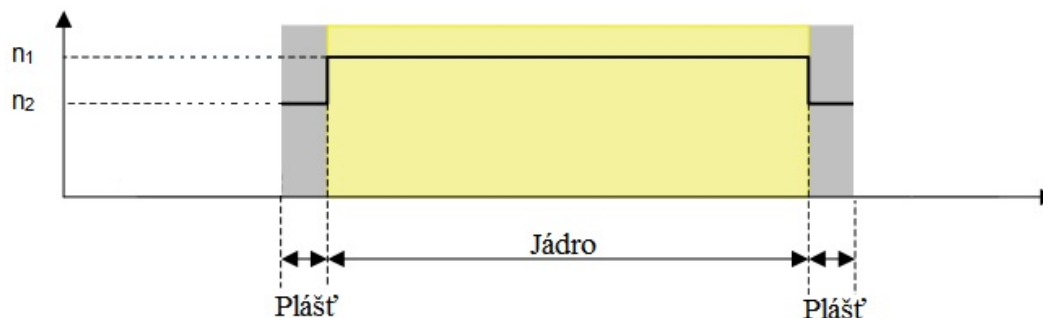
Polymerní optické vlákno se skokovou změnou indexu lomu se skládá z jádra o průměru $980\mu\text{m}$ s indexem lomu 1,492 a pláště tvořeného fluorovaným polymerem s průměrnou tloušťkou $10\mu\text{m}$ a indexem lomu 1,412. U těchto vláken se numerická apertura pohybuje okolo hodnoty 0,5, protože mají větší index lomu na rozhraní materiálů (Obr 1.7). Díky větší hodnotě numerické apertury se šířka pásma pohybuje mezi 40-50MHz na 100m délky. SI-POF se využívají pro přenos dat v automobilech, průmyslu a domácích sítích Fast Ethernet. V dnešní době se hodnoty útlumu SI-POF pohybují okolo 60dB/km. [15] [16]



Obrázek 1.7: Profil indexu lomu SI-POF

2.1.2 Low-NA-POF

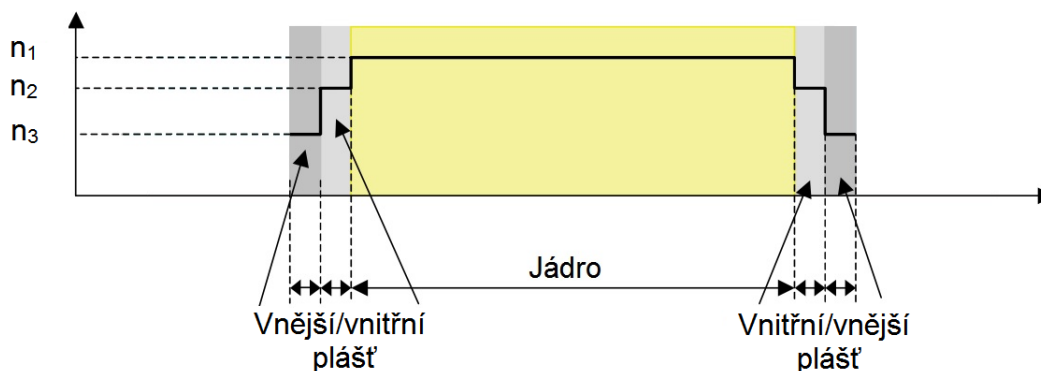
Původním záměrem bylo nahradit metalická vedení pro přenos ATM 155Mb/s na vzdálenost 100 metrů. Aby to bylo možné, musela být navýšena šířka přenosového pásma z původních SI-POF na 100MHz. Struktura vlákna odpovídá standardním POF, ale byl snížen rozdíl mezi indexy lomu pláště a jádra (Obr 1.8). Polymerová vlákna se sníženou hodnotou NA, sice splňují potřebné požadavky na šířku přenosového pásma, ale mají vysokou citlivost na mechanické ohyby. [16]



Obrázek 1.8: *Profil indexu lomu NA-POF*

2.1.3 DSI-POF

Polymerové vlákno s dvojitým skokovým indexem lomu je složeno z jádra, vnitřního pláště a vnějšího pláště, kde vnitřní plášť má vyšší index lomu než vnější (Obr 1.9). V závislosti na poloměru ohybu vlákna se světlo láme buď na prvním (jádro-plášť) nebo druhém (plášť-plášť) rozhraní. Zmíněný princip řeší problém vysokých ztrát ohybem (v porovnání s NA-POF), avšak vlivem dvojitého pláště dochází na dlouhé trase k nárůstu útlumu a disperze. DSI-POF disponují sníženou hodnotou numerické apertury ($NA=0,3$), a proto dochází k nárůstu šířky přenosového pásma na 100MHz/100m. Tato vlákna se využívají především v domácích sítích, LAN sítích a automobilech. [16] [7]

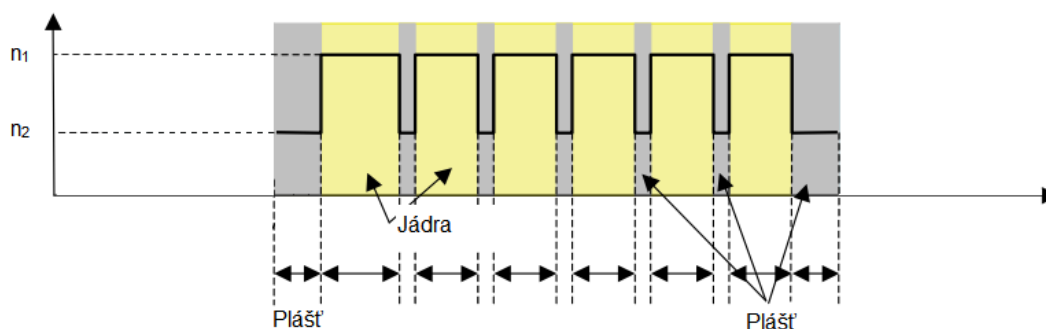


Obrázek 1.9: *Profil indexu lomu DSI-POF*

2.1.4 MC-SI-POF

Jedná se o vícejádrové optické vlákno (typicky 19-200 jader), kde každé jádro má svůj plášť s tloušťkou 5-10 μ m (Obr 1.10). Jednotlivá vlákna jsou poskládána tak, aby vytvořila kruhový průřez o průměru 1mm. Hlavní výhodou MC-SI-POF je snížená citlivost na ohyby, protože pro jejich konstrukci se používají jádra o menším průměru. Zmenšením průměru jádra

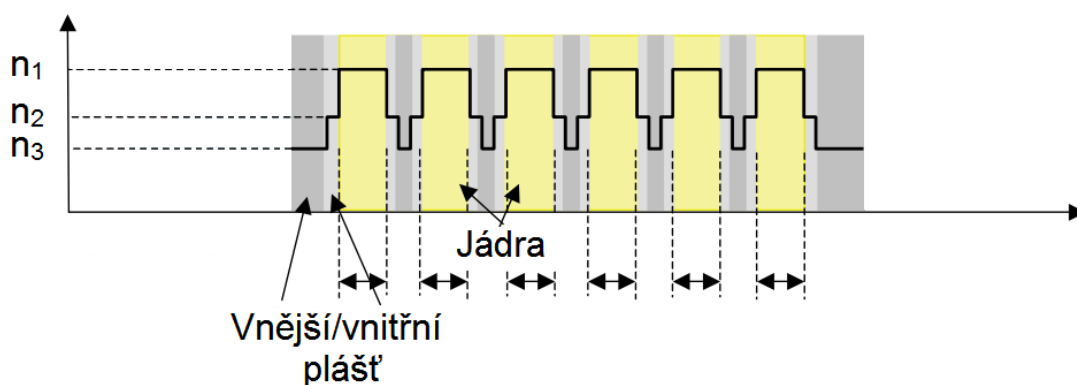
má ale také své nevýhody v podobě složitějšího navázání světla do vlákna. Hodnota numerické apertury je zachována na hodnotě 0,3 a přenosová šířka pásma na 100MHz na 100 metrů, při použití 200 jader. [8]



Obrázek 1.10: *Profil indexu lomu MC-SI-POF*

2.1.5 DSI-MC-POF

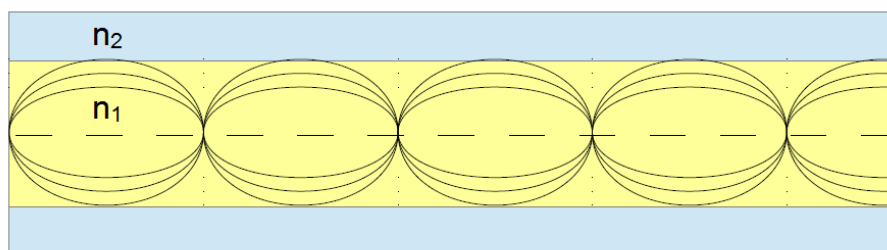
Zvětšení šířky přenosového pásma je dosaženo zmenšením rozdílů mezi indexy lomu (Obr 1.11). DSI-MC-POF vlákna mají sníženou citlivost na ohyb, protože došlo opět ke zmenšení průměru jednotlivých jader. Každé vlákno má svůj vnitřní a vnější plášť s rozdílnou hodnotou indexu lomu. Typické vlákno tohoto typu má 37 jader, numerickou aperturu 0,19 a šířku přenosového pásma 400MHz na 100 metrů. Útlum se pohybuje okolo 155dB/km s využitím světelného záření o vlnové délce 650nm. [16]



Obrázek 1.11: *Profil indexu lomu DSI-MC-POF*

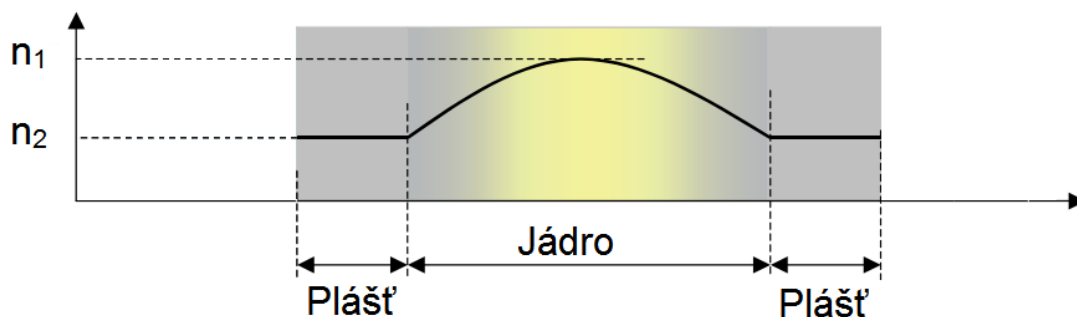
2.1.6 GI-POF

V GI-POF se paprsek nešíří pomocí totálního odrazu na rozhraní jádro-plášť, ale pomocí ohybu světla (Obr 1.12). Jednotlivé paprsky s požadovaným úhlem se ve vlákně nešíří přímo, ale pomocí kruhového nebo parabolického profilu (vrací se k ose jádra). Paprsky vstupující do vlákna v jeho středu se šíří jádrem bez jakékoliv interakce s pláštěm. [15] [16]



Obrázek 1.12: Šíření světla v GI-POF

S přibývajícím vzdáleností od středu jádra se postupně snižuje index lomu (Obr 1.13) a paprsky se šíří rychleji než paprsky ve středu jádra. Mezi hlavní výhody GI-POF patří navýšení šířky přenosového pásma a snížení vidové disperze. Typické hodnoty numerické apertury se pohybují okolo 0,20 a přenosová šířka pásma byla navýšena až na 2GHz na 100 metrů. [16]

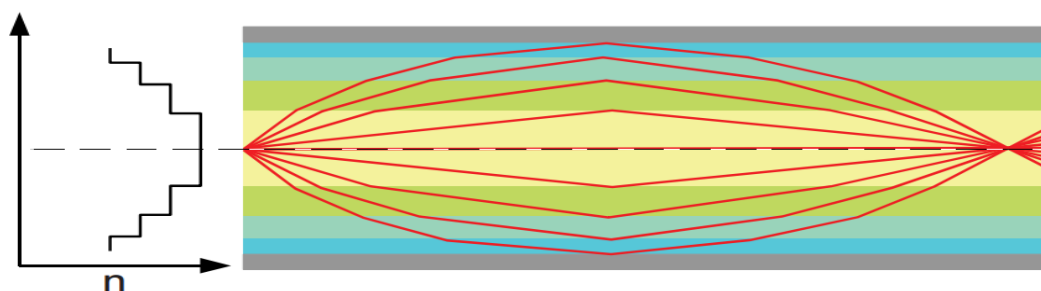


Obrázek 1.13: Profil indexu lomu GI-POF

V dnešní době se používají multimódová GI-POF s průměry jádra 50, 60 a 120 μ m, které dosahují vysokých přenosových rychlostí, mají nízké hodnoty útlumu (15dB/km při 1300nm) a rozptylu. Ve srovnání s klasickými vlákny mají výborné mechanické vlastnosti (dlouhodobý poloměr ohybu 5 a 10mm). Vzhledem k nízké materiálové disperzi se používají pro vysokorychlostní gigabitový přenos na vzdálenost až 100 metrů nebo pro Fast Ethernet na vzdálenost 200 metrů. [17]

2.1.7 MSI-POF

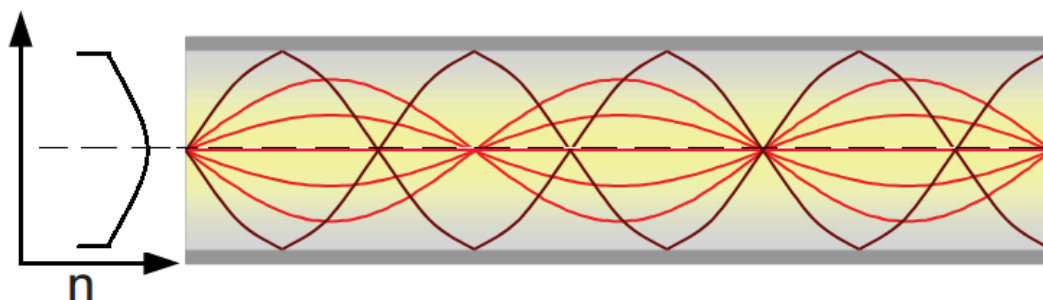
Jádro MSI-POF je složeno z mnoha vrstev (většinou 4-7), ve kterých se světlo nešíří kontinuálně jako u GI-POF, ale pomocí vícenásobných odrazů na jednotlivých rozhraních (Obr 1.14). Cílem bylo přiblížit se k parametrům GI-POF při zachování jednoduché výrobní technologie. Hodnota numerické apertury se pohybuje v rozmezí 0,25-0,30 a šířka přenosového pásma dosahuje 500MHz na 100m. Průměr jádra multimódového polymerního vlákna se skokovou změnou indexu lomu je 990 μ m. [16]



Obrázek 1.14: Šíření světla v MSI-POF

2.1.8 Semi-GI-POF

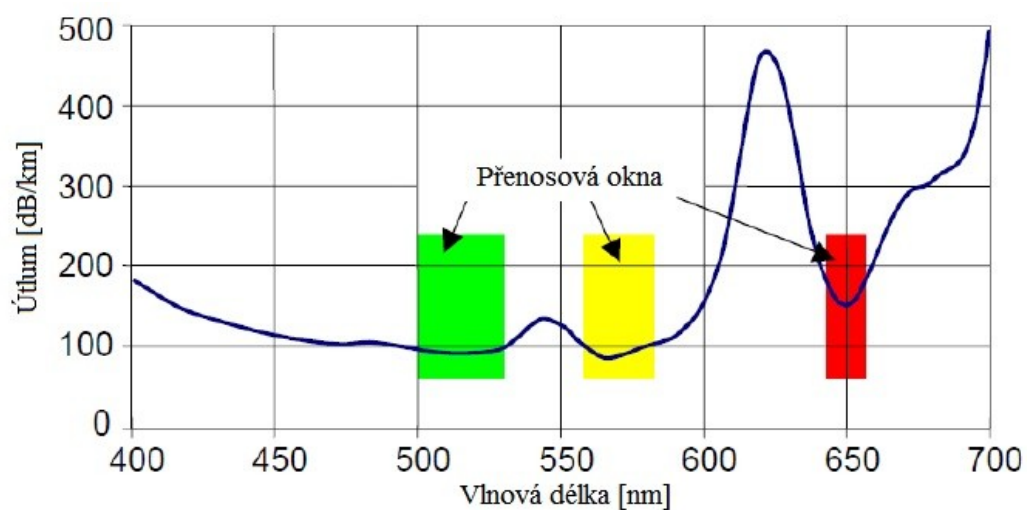
Nejnovější verze polymerních vláken tzv. Semi-GI-POF využívají gradientní šíření paprsků s mírně proměnlivým indexem lomu uvnitř jádra, ale zároveň také se skokovým indexem lomu (Obr 1.15). Paprsky se přednostně šíří gradientně. Jestliže dojde ke zvětšení úhlu, pod kterým se paprsek šíří (ohyb vlákna), dojde k totálnímu odrazu na rozhraní jádro-plášť. Paprsky šířící se gradientně mají velmi malou vidovou disperzi. [15]



Obrázek 1.15: Šíření světla v Semi-GI-POF

2.2 Přenosová okna polymerových optických vláken

Přenosová okna POF (Obr 1.16) spadají do viditelného pásma elektromagnetického spektra 400-760nm. Vzhledem k hodnotám útlumu se pro přenos přednostně využívají přenosová okna s vlnovou délkou 520nm (zelená LED), 560nm (žlutá LED) a 650nm (červená LED). [16]



Obrázek 1.16: Přenosová okna POF

3 Polydimetylsiloxan

3.1 Úvod

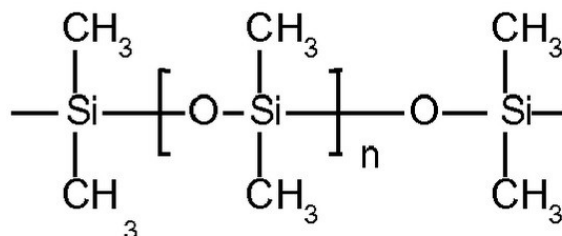
Polydimetylsiloxan patří mezi polymerní organokřemičité sloučeniny, které obsahují v jedné molekule vazbu Si-O, velice často je označován jako silikonový kaučuk. Pevnost silikonových kaučuků je nízká, ale v širokém rozsahu teplot se téměř nemění. Běžné teploty použitelnosti se pohybují v rozmezí -60°C až + 200°C a při krátkodobém teplotním namáhání odolají teplotě až 350°C. [18][19]

Základní rozdělení silikonových kaučuků:

- polydimetylsiloxany pro obecné použití
- polydimetylsiloxany s fenylovými substituenty (za nízkých teplot zlepšená ohebnost)
- polydimetylsiloxany s 1,1,1- trifluorpropylovými substituenty (odolné vůči olejům a palivům)

Z hlediska chemického složení patří polydimetylsiloxan mezi opticky čisté materiály, které obsahují jen malou míru nečistot a nejsou tak vhodným prostředím pro bakterie. Polydimetylsiloxan je čirá kapalina bez zápachu a chuti, která je díky své vysoké viskozitě téměř nerozpustná ve vodě. PDMS je odolný vůči vysokým teplotám, chemikáliím, radiaci a UV záření. Využití nachází v širokém spektru odvětví např. v letectví, kosmonautice, lékařství, potravinářství, elektronice a automobilovém průmyslu. Hlavní nevýhodou je nákladná a složitá výroba, výhodou je pak především výborná teplotní stabilita. [19]

Pro výrobu polydimetylsiloxanu se používá technický křemík a kombinace kyseliny chlorovodíkové a metanolu, která vytváří chlormetan. Výroba postupně prochází čtyřmi chemickými reakcemi (syntézou, rektifikací, hydrolýzou, polykondenzací). Konečné chemické složení polydimetylsiloxanu zobrazuje Obr. 1.17. Organický substituent je většinou reprezentován metylem (CH₃). [19]



Obrázek 1.17: Chemické složení polydimetylsiloxanu

3.2 Sylgard

Sylgard je označení pro dvousložkový zalévací a zapouzdřovací elastomer na bázi polydimetylsiloxanu doplněného o vytvrzovací činidlo. Teprve po přidání vytvrzovacího činidla lze PMDS zvýšenou teplotou vytvrdit. Různé varianty silikonových gelů mají různé vlastnosti, a proto se liší i svým použitím.

3.2.1 Sylgard 182 a 184

Sylgard 182 a 184 patří mezi středně viskózní kapalné elastomery, které se používají v rozsahu teplot od -55°C do $+200^{\circ}\text{C}$. V širokém rozsahu frekvencí mají výbornou fyzikální a elektrickou stabilitu a díky své odolnosti vůči vodě poskytují ochranu proti vnějšímu prostředí. Oba elastomery jsou odolné proti mechanickému poškození a radiaci. Hlavní rozdíl mezi těmito kaučuky je ve způsobu vytvrzování. Zatímco Sylgard 182 je vytvrzován teplem, tak Sylgard 184 se vytvrdí již při pokojové teplotě 25°C , proto je vhodný pro zalévání solárních panelů. [19]

Použití:

Oba druhy jsou speciálně navrženy pro zapouzdřování desek plošných spojů, zdrojů proudu, transformátorů, zesilovačů apod. Také se používají jako pružná ochrana pro konektory, vinutí nebo např. pro výrobu tiskové základny u technologie 3D tisku. [19]

3.2.2 Sylgard 170

Sylgard 170 se především vyznačuje vynikající samozhášecí schopností a po vytvrzení je velice pružný, snadno opravitelný a vysoce odolný. Sylgard 170 je certifikován dle normy EN 50028 (zapouzdření typu "m" - nebezpečí výbuchu). Teplotní rozsah se pohybuje od -60°C až $+200^{\circ}\text{C}$. Jednotlivé složky jsou barevně rozlišeny, proto se poměr mísení 1:1 dá kontrolovat i vizuálně. Udávané teploty pro vytvrzení jsou 70°C (15 minut), 100°C (8 minut) a při teplotě 150°C pouze 3 minuty. [19]

Použití:

Tento elastomer je využíván pro zalévání televizních transformátorů, zvedacích magnetů a elektronických jednotek v automobilovém průmyslu. Také se používá pro zapouzdřování elektrických zdrojů, relé a feritových jader. [19]

3.2.3 Sylgard 517

Sylgard 517 je nízkoviskózní dielektrický samozacelující gel, který má trvalou adhezi k většině materiálů. Vytvrzení probíhá za pokojové teploty, při zvýšené teplotě dochází

ke zrychlení tohoto procesu. Doporučené teploty pro vytvrzení jsou 60°C (4 hodiny), 100°C (1 hodina) a 150°C (15 minut). Obě složky produktu se míchají v poměru 1:1. [19]

Použití:

Speciálně navržen pro aplikace, kde se vyžaduje dlouhotrvající těsnicí efekt proti vlhkosti, např. v optoelektronice pro zalévání optických kabelů a spojek. Dále slouží jako ochrana pro elektronické a hybridní obvody. [19]

3.3 Vlastnosti polydimetylsiloxanu

V následujících podkapitolách se nachází souhrn typických, mechanických a elektrických vlastností dvou nejrozšířenějších silikonových elastomerů Sylgard 182 a Sylgard 184. Optické vlastnosti PDMS jsou porovnány s materiály, které se v současné době nejvíce využívají pro výrobu optických vláken (SiO₂, PMMA).

3.3.1 Typické a mechanické vlastnosti

Typická vlastnost	Sylgard 182	Sylgard 184
Viskozita základní složky [mPas]	5475	5100
Viskozita po přidání vytvrzovacího činidla [mPas]	4575	3500
Doba použitelnosti při 25°C [hod]	8	2
Po vytvrzení		
Odolnost vůči teplotnímu šoku (-55°C - 155°C)	10 cyklů	10 cyklů
Tepelná vodivost [W/m.K]	0,16	0,16
Hořlavost dle normy UL94	V-1	V-1

Tabulka 1.4: *Typické vlastnosti silikonových gelů Sylgard 182 a Sylgard 184*

V-0: samozhášecí, krátký čas hoření, nejvyšší bezpečnost

V-1: samozhášecí, střední čas hoření, dobrá bezpečnost

V-2: samozhášecí, dlouhý čas hoření, omezená bezpečnost

Mechanická vlastnost	Sylgard 182	Sylgard 184
Tvrlost (Shore)	A51	A48
Mez pevnosti v tahu [MPa]	6,2	6,2
Pevnost v roztržení [kN/m]	2,7	2,7
Bod lámavosti [°C]	< -70	< -70

Tabulka 1.5: *Mechanické vlastnosti silikonových gelů Sylgard 182 a Sylgard 184*

Tvrlost Shore se měří přitlačným tvrdoměrem, který se nazývá durometr. Stupnice tvrdost Shore A se používá pro určení tvrdosti měkkých gum, polyesterů, PVC, kůží, nitrilových gum apod. Číslo vyjadřuje tvrdost materiálu (0-100), kdy 0 reprezentuje měkké materiály a 100 materiály tvrdé. Sylgard se nachází na této stupnici zhruba uprostřed a jeho tvrdost se dá např. přirovnat k tvrdosti těsnící gumy u dveří. Ve srovnání s polymerovými (48-76MPa) a křemennými (3,45GPa) optickými vlákny má polydimetylsiloxan po vytvrzení malou pevnost v tahu (6,2MPa).

3.3.2 Elektrické vlastnosti

Mechanická vlastnost	Sylgard 182	Sylgard 184
Dielektrická pevnost E [kV/mm]	19	14
Relativní permitivita ϵ, 100Hz	2,65	2,72
Relativní permitivita ϵ, 100kHz	2,65	2,68
Ztrátový součinitel $\tan \delta$, 100Hz	0,005	0,0023
Ztrátový součinitel $\tan \delta$, 100kHz	0,005	0,0013
Rezistivita ζ [Ω.cm]	$1,6 \cdot 10^{15}$	$2,9 \cdot 10^{14}$

Tabulka 1.6: *Elektrické vlastnosti silikonových gelů Sylgard 182 a Sylgard 184*

Polydimetylsiloxan patří díky své vysoké rezistivitě mezi elektrické izolanty, stane se vodivým až po překlenutí průrazného napětí řádově kV/mm (dielektrická pevnost). Elektrickou vodivost lze ovlivnit přidáním vodivých příměsí.

3.3.3 Optické vlastnosti

Vlnová délka [nm]	Index lomu PDMS	Index lomu PMMA	Index lomu SiO ₂
589	1,411	1,490	1,458
632	1,422	1,488	1,457
1320	1,402	1,484	1,446
1550	1,399	1,479	1,444

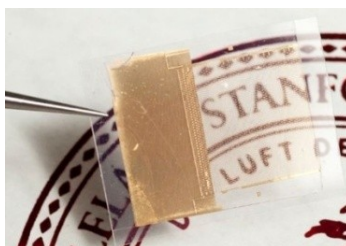
Tabulka 1.7: Srovnání indexu lomu PDMS, PMMA a SiO₂

Ve srovnání s uvedenými materiály má polydimetylsiloxan velice výhodný index lomu. Díky nižšímu indexu lomu se sníží hodnota numerické apertury a navýší se tak možná přenosová rychlost a šířka pásma. Nevýhodou pak bude složitější navázání světla do vlákna. Optická propustnost PDMS nedosahuje sice propustnosti SiO₂ (99,99%), ale převyšuje propustnost PMMA (92%) o 4%. Absorpce polydimetylsiloxanu se pohybuje okolo 0,04%.

3.4 Aplikace polydimetylsiloxanu

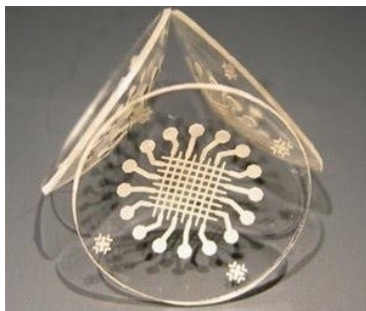
Tento materiál se do nedávna využíval pouze pro zalévání a zapouzďování desek plošných spojů, televizních transformátorů apod. (Kapitola 3.2), ale v dnešní době je velice rozšířený i v jiných odvětvích. V této kapitole jsou uvedeny nejnovější aplikace PDMS, které jsou prozatím ve fázi výzkumu.

Průhledné baterie - tyto baterie mají stejnou výdrž, výkon a kapacitu jako dnešní baterie. Technologie využívá tenký polymerní film (PDMS), do kterého je přidána vodivá vrstva (Obr 1.18). Hustota energie v baterii je srovnatelná s nikl-kadmiovými bateriemi (10Wh na litr objemu). [20]



Obrázek 1.18: *Transparentní baterie*

Chytré kontaktní čočky - uvnitř kontaktních čoček je umístěn senzor (Obr 1.19) pro měření tlaku uvnitř oka. Svého majitele včas varují před zeleným zákalem, který způsobí změnu elektrického odporu v obvodu umístěného uvnitř kontaktní čočky. Elektrickou vodivost polymeru zajistí ionty stříbra uspořádané do mřížky (Obr 1.19). [21]



Obrázek 1.19: *Chytré kontaktní čočky*

Chytré telefony - jednoduchou a levnou metodou lze s využitím gravitace vyrobit čočku z PDMS. Připevněním k fotoaparátu mobilního telefonu se chytrý telefon promění na lupu, která dokáže zvětšit předměty až 160x (Obr 1.20). [22]



Obrázek 1.20: *Zvětšovací čočka*

Další aplikace PDMS:

- Prsní implantáty
- Vlasová kosmetika
- V potravinářství jako odpěňovač
- Mazací oleje
- Tepelně odolné dlaždice

4 Praktická část

4.1 Úvod

Stěžejním úkolem bylo zjistit, který zdroj tepla bude pro vytvrzení polydimetylsiloxanu nejvhodnější a jakým způsobem docílit správného (úplného) vytvrzení. V prvním případě byla do laboratorního stojanu uchycena pomocí držáku nádobka s kapalinou (PDMS), která byla zahřívána nad přímým plamenem (Obr 1.21a). Teplota polydimetylsiloxanu byla měřena vpichovým teploměrem a regulována změnou vzdálenosti nádoby od plamene. Teplota byla postupně měněna v rozmezí 50-150°C a tvrzení probíhalo 2 hodiny bez úspěchu. Polydimetylsiloxan se nevytvrdil, pouze se nepatrně zvýšila jeho viskozita.

V druhém případě byla nádobka s kapalinou vložena do vodní lázně, jejíž teplota byla regulována pomocí kuchyňského vaříče. Kontrola teploty byla prováděna rtuťovým teploměrem, který umožňoval měřit teploty do 100°C (bod varu). Nádobka musela být zatížena těžkým předmětem, aby nedocházelo k jejímu pohybu po hladině a nedošlo tak k převrnutí (Obr 1.21b). Ani v tomto případě však pokus nebyl úspěšný a k vytvrzení polydimetylsiloxanu nedošlo.



Obrázek 1.21: a) Zahřívání PDMS přímým plamenem b) Zahřívání PDMS ve vodní lázni

K vytvrzení polydimetylsiloxanu došlo v obou případech až po přimíchání vytvrzujícího činidla, a to v poměru 10:1, jak udává jeho výrobce (Kapitola 3.2, Sylgard 182). Nabízela se tedy otázka, zda při nedodržení správného poměru dojde k úplnému vytvrzení silikonového gelu.

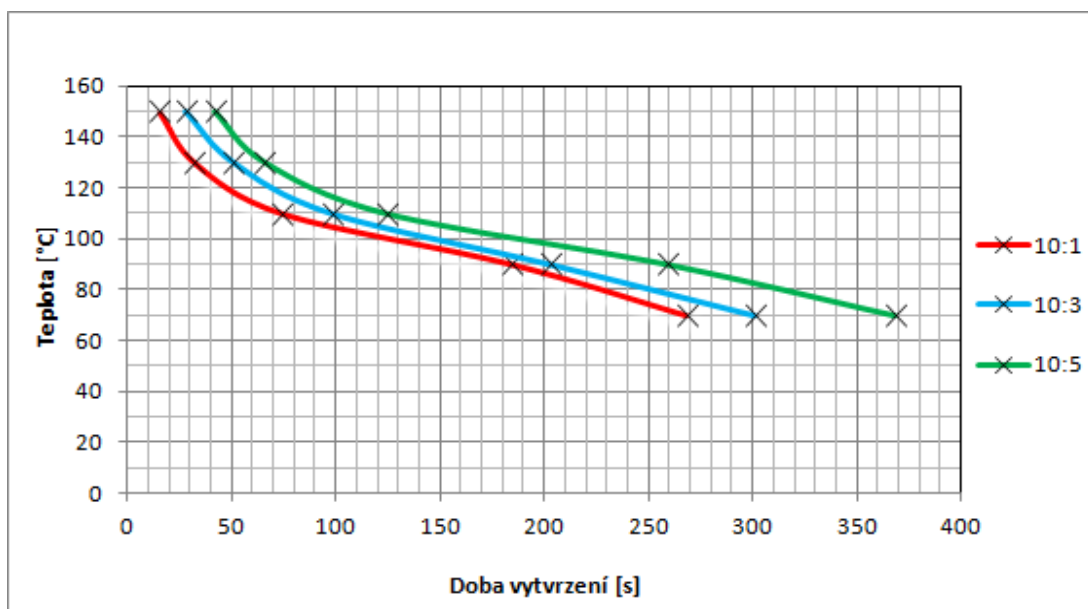
Pro zmíněný pokus jsem si připravil tři různé poměry směsi (Obr 1.22) s hmotností základního materiálu 1g (PDMS) a zvolil pět vytvrzovacích teplot 70, 90, 110, 130 a 150°C. Připravené poměry směsí jsem postupně naléval na nerezový plech, který jsem zahříval

kuchyňským vaříčem na zvolené teploty a kontroloval vpichovým teploměrem. Pokud teplota převýšila zvolenou teplotu, vaříč jsem vypnul a nerezový plech se silikonovým gelem odstranil mimo jeho dosah. Takto jsem celý postup aplikoval na všechny mnou zvolené teploty a výsledek zaznamenal do grafu (Obr 1.22).



Obrázek 1.22: Testované poměry mísení

Nedodržení poměru mísení, který udává výrobce, nikterak výrazně neovlivnilo dobu vytvrzení. Při teplotě 150°C se směs v poměru 10:1 vytvrdila za 15 sekund, u poměru 10:3 došlo k vytvrzení za 28 sekund a u poměru 10:5 za 45 sekund. S klesající teplotou se navyšovala doba vytvrzení, u poměru 10:1 až na 267 sekund, u poměru 10:3 na 301 sekund a poměru 10:5 na 368 sekund. Změna poměru měla za následek zmenšení viskozity polydimetylsiloxanu, čím více vytvrzovacího činidla bylo přidáno, tím více se zmenšovala viskozita základního materiálu (PDMS). Nedodržení poměru sice nijak výrazně neovlivnilo dobu vytvrzení, ale mohlo by mít za následek zhoršení vlastností polydimetylsiloxanu, proto je žádoucí daný poměr co nejpřesněji dodržovat.



Obrázek 1.23: Závislost doby vytvrzení vzorků na teplotě a poměru mísení

4.2 Specifikace dob vytvrzování a teploty ve vztahu na hmotnost vzorků a jejich rozměry

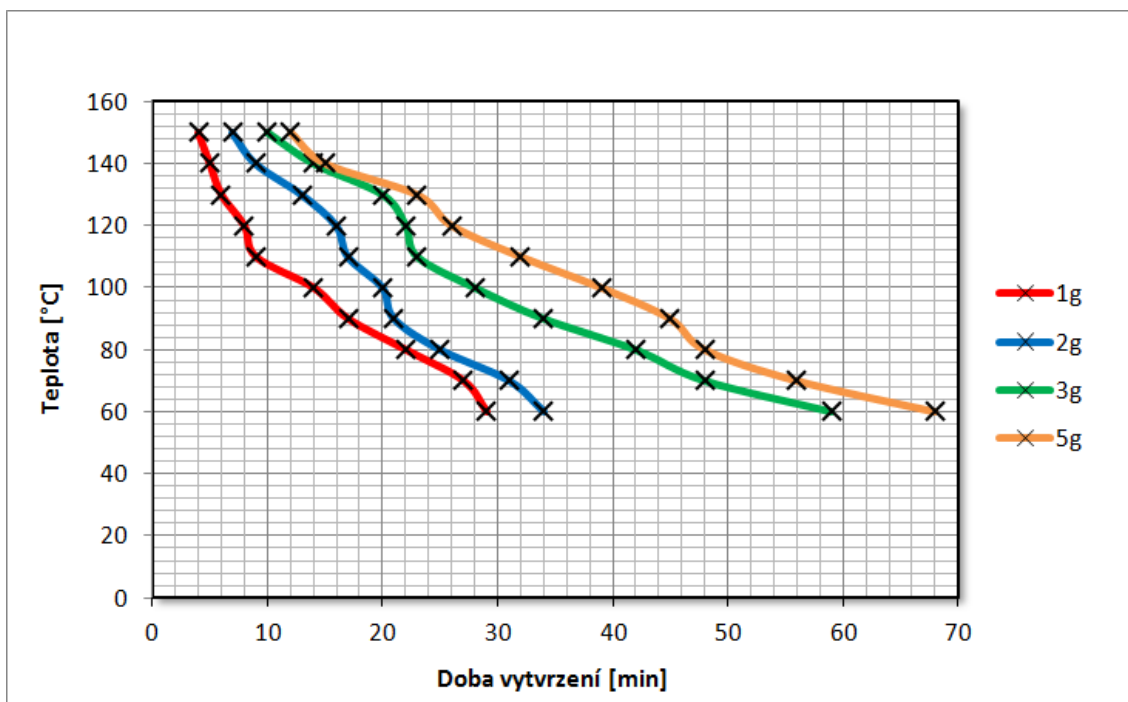
Pro stanovení specifikace doby vytvrzování a teploty ve vztahu na hmotnost vzorků jsem si zhotovil speciální odlévací formu o rozměrech 2,7 x 2,7 x 3mm, kterou jsem zajistil rozdílnou výšku jednotlivých vzorků (Obr 1.24). Teploty vytvrzení jsem volil dle doporučení katalogového listu Sylgard 182 (60-150°C), se kterým jsem po celou dobu pracoval. Hmotnosti vzorků, výšku vzorků, teploty pro vytvrzení vzorků a naměřené doby vytvrzení zobrazuje Tabulka 1.8.



Obrázek 1.24: Odlévací forma

°C	Hmotnost a výška vzorku			
	1g (2mm)	2g (3mm)	3g (4mm)	5 (6mm)
60	29	34	59	68
70	27	31	48	56
80	22	25	42	48
90	17	21	34	45
100	14	20	28	39
110	9	17	23	32
120	8	16	22	26
130	6	13	20	23
140	5	9	14	15
150	4	7	10	12

Tabulka 1.8: Doba vytvrzení vzorků o různé hmotnosti a výšce



Obrázek 1.25: Závislost doby vytvrzení vzorků na teplotě, hmotnosti a velikosti vzorku

Z grafu lze vyčíst, že s rostoucí teplotou se snižuje doba potřebná pro vytvrzení daného vzorku. Vzorek s hmotností 1g byl vytvrzen teplotou 150°C za 4 minuty a teplotou 60°C za 29 minut. Vzorek o největší hmotnosti byl vytvrzen za 12 minut (při teplotě 150°C) a při nejnižší teplotě (60°C) za 68 minut. Zatímco u vzorku s hmotností 1g je časové rozpětí mezi nejmenší a největší použitou teplotou 25 minut, u vzorku s hmotností 5g je časové rozpětí 56 minut. S rostoucí hmotností vzorku se časové rozpětí rapidně zvýšilo. Nárůst časového rozpětí doby vytvrzení byl způsoben velikostí (výškou) vzorku.

4.3 Výroba válcového vlnovodu

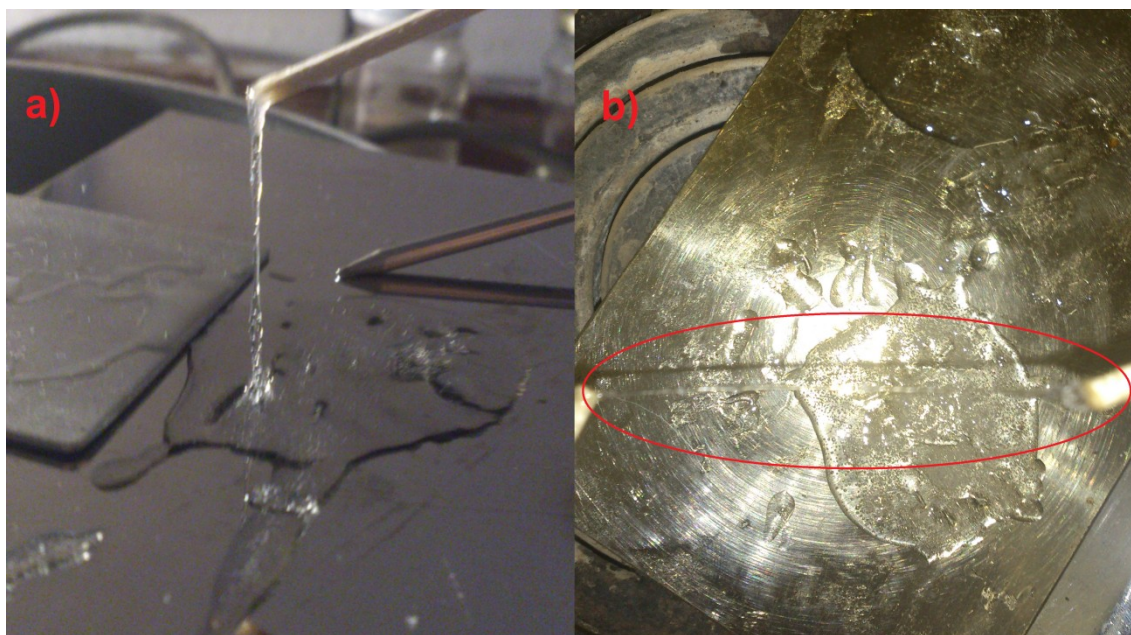
Výroba optického válcového vlnovodu z polydimetylsiloxanu není prozatím známou technologií, proto mým úkolem bylo zvolit nejvhodnější postup výroby tak, aby bylo dosaženo dokonalé cylindrické struktury vlnovodu. V zásadě byly odzkoušeny dva postupy, které jsou podrobně popsány v následujících podkapitolách. U první metody výroby bylo použito tzv. tažení z částečně vytvrzeného PDMS, zatímco principem druhé metody bylo okamžité vytvrzení materiálu za použití vhodných teplot.

4.3.1 Výroba válcového vlnovodu pomocí tažení

Zdrojem tepla byl kuchyňský vaříč, na který jsem položil tenký nerezový plech. Nerezový plech se pro tento účel jevil jako vhodnější varianta než klasický železný plech, který obsahuje mnoho pórů, do kterých by PDMS mohl lehce zatéct.

Připravená směs polydimetylsiloxanu a vytvrzujícího činidla ve správném poměru byla nalita na nerezový plech zahřátý na minimální teplotu pro vytvrzení 60°C. Teplota byla kontrolována vpichovým teploměrem CEM DT - 131, který je schopen měřit teploty v rozmezí od -40°C až do teploty 250°C. Vpichový teploměr reagoval na teplotní změnu velice pomalu, proto bylo nutné nejprve dosáhnout požadované teploty a až poté aplikovat připravenou směs. Abych mohl tímto způsobem vyrobit vlnovod, musel jsem PDMS nejprve částečně vytvrdit a ve vhodný okamžik vytáhnout silikonový gel kulatým předmětem směrem nahoru. Teplota byla postupně zvyšována až na 100°C a po dosažení této hranice se viskozita materiálu začala rapidně zvyšovat. S vyšší teplotou se snižovala doba zpracování, proto bych v tomto případě jako ideální teplotní rozmezí stanovil na 60 - 90°C.

U této metody zpracování bylo vytažené vlákno (Obr 1.26a) jen částečně vytvrzené a nedosahovalo dokonalé cylindrické struktury, a to i při tažení od sebe pomocí dvou kulatých předmětů (Obr 1.26b). Na základě tohoto zjištění bylo tedy nutné hledat pro výrobu optického vlnovodu jinou cestu i za cenu použití vlákna o větším průměru.



Obrázek 1.26: a) Tažení vlákna pomocí kulatého předmětu b) Tažení vlákna pomocí dvou kulatých předmětů směrem od sebe

4.3.2 Výroba válcového vlnovodu pomocí kapiláry

Myšlenkou této metody bylo, že silikonovým gelem naplním trubičku o malém průměru. Za použití Sylgardu 182 musela trubička odolat zvýšené teplotě a její následné odstranění muselo být co nejšetrnější, aby nedošlo k mechanickému poškození válcového vlnovodu, v ideálním případě by mohla být rozpuštěna v chemickém roztoku, protože jednou z vlastností PDMS je odolnost vůči chemikáliím.

4.3.2.1 Příprava silikonového gelu

Za pomoci injekční stříkačky jsem si nejprve odměřil 1ml vytvrzovacího činidla, které jsem vytlačil do druhé injekční stříkačky. Stejným způsobem jsem postupoval při dávkování PDMS, pouze s rozdílnou hodnotou objemu (10ml). Při manipulaci s materiálem docházelo ke vzniku vzduchových bublin, které při pokojové teplotě zmizely po 30 - 40 minutách v závislosti na jejich velikosti a počtu. Proces zmizení nežádoucích vzduchových bublin jsem urychlil uložením připravené směsi do chladného prostředí, kde stoupají lehčí částice vzhůru mnohem rychleji (rozpuštnost kyslíku s rostoucí teplotou klesá). Uložení injekční stříkačky do chladu zapříčinilo urychlení celého procesu o 15 - 25 minut (Obr 1.27) a navíc prodloužilo dobu zpracovatelnosti materiálu z původních 8 hodin na zhruba 48 hodin.



Obrázek 1.27: Odstranění vzduchových bublin

4.3.2.2 Příprava pomůcek a dávkování silikonového gelu

Při výrobě válcového vlnovodu byla jako hlavní prvek použita měděná kapilára, aby bylo možné provést leptání a tím zmizení "obalu" válcového vlnovodu. Dávkování silikonového gelu do měděné kapiláry s průměrem 2 a 3mm pomocí injekční stříkačky s injekční jehlou o průměru 0,9mm probíhalo takovým způsobem, aby gel stékal po stěně kapiláry (vertikální poloha kapiláry). Menší průměry injekčních jehel 0,6mm

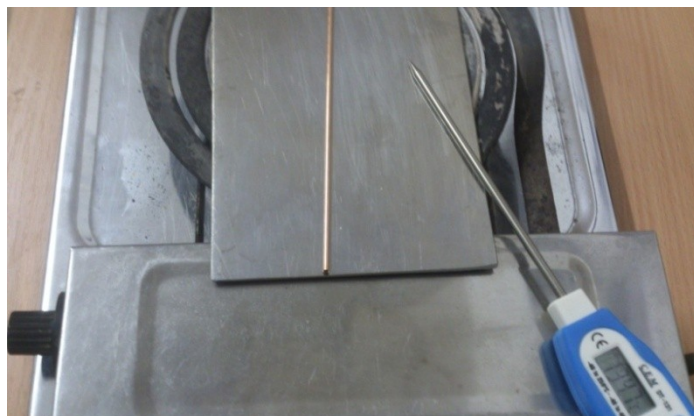
a 0,4mm se neosvědčily, protože viskozita materiálu způsobila zhoršení průchodnosti nebo úplné ucpání injekční jehly. Naplněná kapilára byla uložena do chladu, kde vzniklé bublinky opět vymizely (jedna strana kapiláry musela zůstat otevřena, aby měly vzduchové bublinky kam unikat). Lze tedy konstatovat, že každá další manipulace s materiálem zapříčinila tvorbu vzniku nových vzduchových bublin, jejichž množství bylo vždy třeba co nejvíce eliminovat uložením do chladu. Všechny použité pomůcky zobrazuje následující obrázek (Obr 1.28).



Obrázek 1.28: *Použité pomůcky*

4.3.2.3 *Vytvrzení silikonového gelu*

Na nerezový plech, který byl pomocí kuchyňského vaříče zahříván, byla položena měděná kapilára a po určitých časových intervalech otáčena tak, aby bylo možno zajistit rovnoměrné vytvrzení materiálu (Obr 1.29). Vysoká teplota, které byla kapilára vystavena, zapříčinila tvorbu nových vzduchových bublin, ty částečně odcházely záměrně neúplně uzavřenou kapilárou. Aby z měděné kapiláry vyteklo co nejméně silikonového gelu, bylo zapotřebí co nejrychlejšího vytvrzení, takže použité teploty se pohybovaly v rozmezí 145 - 150°C (Kapitola 4.2).



Obrázek 1.29: *Vytvrzení silikonového gelu*

4.3.2.4 *Leptání měděné kapiláry*

Pro prvotní leptání kapiláry byl použit leptací roztok chlorid železitý (FeCl_3), kterým se běžně leptají desky plošných spojů potažené měděnou fólií tloušťky $35\mu\text{m}$. Chlorid železitý je silná žiravina, proto byly pro bezpečné zacházení s roztokem použity ochranné pomůcky (gumové rukavice a brýle).

Leptací roztok za 20 minut odleptá $35\mu\text{m}$ měděnou fólii, to znamená, pokud budeme mít měděnou kapiláru s tloušťkou stěny $0,45\text{mm}$, tak leptání bude trvat 4 hodiny a 29 minut. Orientační výpočet byl proveden proto, aby vytvořený vlnovod nezůstal v lázni příliš dlouho, než je nezbytně nutné, protože jeho odolnost vůči chloridu železitému zatím nebyla známa. Vypočtená doba se lišila od skutečnosti, protože s přibývajícím dobou leptání klesal účinek chloridu železitého, a proto leptání trvalo o 4 hodin déle.

Měděná kapilára byla v plastové misce zcela ponořena do leptacího roztoku (Obr 1.30) a každých 20 minut otáčena tak, aby se odstranila odleptaná vrstva mědi na povrchu kapiláry. Chlorid železitý není sice tak agresivní jako jiné roztoky, ale jeho žlutohnědé zbarvení silně zabarvilo odleptané vlákno tak, že se stalo nepoužitelným.



Obrázek 1.30: *Leptání pomocí chloridu železitého*

K leptání lze také užít starší, ale osvědčený způsob kyselinou chlorovodíkovou (HCl) smíchanou s peroxidem vodíku (H_2O_2). Pro leptání mědi se užívá technická kyselina chlorovodíková 31% v kombinaci s tříprocentním peroxidem vodíku. Po přidání peroxidu vodíku vzniká exotermická reakce, uvolňující teplo rozkládá peroxid vodíku, čímž vznikne kladná zpětná vazba, která se projeví vznikem bublinek. Vzniklé bublinky unikají postupně do vzduchu a odleptávají měď, navíc sebou "berou" i kyselinu chlorovodíkovou a vzniká tak dráždivá leptající pára (chlorid sodný). Kyselina je natolik silná, že veškerá elektronika a železné předměty v místnosti bez zajištění větrání zkorodují.

V tomto případě byla měděná kapilára v plastové misce zalita zhruba do poloviny kyselinou chlorovodíkovou, pak byl postupně přidáván peroxid vodíku tak, aby vznikla exotermická reakce (Obr 1.31). Čím více bylo přidáváno peroxidu vodíku, tím silnější byla vyvolaná reakce. Doporučený poměr mísení bych odhadoval na jeden díl kyseliny solné a dva díly peroxidu vodíku, pokud bychom přidali mnoho peroxidu vodíku, mohlo by dojít k přetečení nádoby, proto je důležité si tento poměr hlídat. Leptání dvou kapilár trvalo 10 hodin.



Obrázek 1.31: *Vznik exotermické reakce*

4.3.2.5 *Vylepšení způsobu dávkování*

Dávkování pomocí injekční stříkačky bylo velice zdlouhavé a často docházelo k ucpání a úniku gelu v místě spojení injekční stříkačky a injekční jehly. Proto bylo třeba najít rychlejší a lepší způsob, který by zajistil efektivní využití připraveného materiálu bez nežádoucího úniku. U původního způsobu dávkování byla jedna strana kapiláry otevřená a druhá uzavřená, aby při dávkování nemohl silikonový gel vytékat. Nastal ale problém s odchodem vzduchu z kapiláry, který se tvořil uvnitř těla injekční stříkačky vždy při nasazení vyjímatelné části. Jelikož neměl vzduch kam unikat, musela být kapilára opět vložena do chladného prostředí.

U vylepšeného způsobu zpracování byla použita neuzavřená kapilára, aby došlo k odstranění velké vzduchové bubliny uvnitř injekční stříkačky a zamezilo se tak vzniku malých vzduchových bublin uvnitř vlnovodu. Nejprve tedy ze stříkačky odešel vzduch a až poté silikonový gel, pro lepší manipulaci byla kapilára uchycena do dílenského svěráku (Obr 1.32). Nasazenou bužírkou upravenou přímým plamenem na potřebný průměr se zamezilo vytékání gelu v místě spojení s injekční stříkačkou.

Jakmile došlo k naplnění kapiláry, začal gel vytékat vrchním otvorem kapiláry a mohlo dojít k jejímu uzavření pomocí štípacích kleští (nejprve z vrchní strany a poté ze spodní strany).



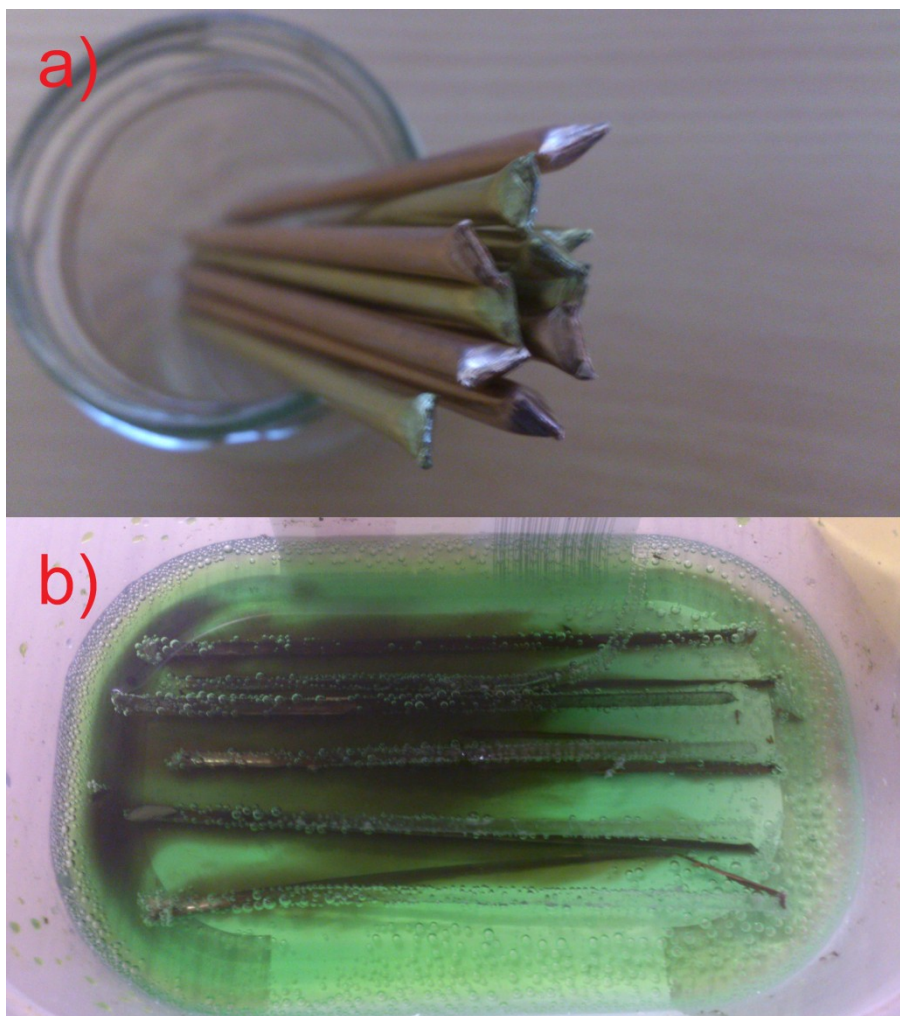
Obrázek 1.32: *Dávkování silikonového gelu*

4.3.2.6 *Výroba dalších vzorků*

Stejným principem popsaným výše bylo připraveno 5 měděných a 6 mosazných kapilár o průměru 4mm s tloušťkou stěny 0,45mm. Větší průměr byl zvolen záměrně, abych zajistil volný průchod materiálu bužírkou nasazenou na injekční stříkačku. Připravené kapiláry (Obr 1.33a) byly pro jistotu umístěny na 15 minut do chladného prostředí a následně již známým postupem vytvrzeny.

Jelikož jsem leptal všechny kapiláry zároveň v jedné plastové misce, byl leptací roztok průběžně vyměňován, abych zamezil zániku exotermické reakce. S přibývajícím dobou ztrácela chemická reakce svůj účinek a v misce se navíc usazovalo velké množství mědi a mosazi. Celkový čas leptání jedenácti kapilár se pohyboval v rozmezí 40 - 48 hodin.

Protože dobu leptání bylo složité odhadnout, musel jsem každých 20 minut provést vizuální kontrolu, popřípadě přidat peroxid vodíku nebo vyměnit celý roztok. Na Obr 1.33b je zaznamenán konec leptání, kde jsou již vidět jednotlivé vlnovody plovoucí na hladině leptacího roztoku. Vyndané vlnovody byly vloženy do nádoby s vodou, aby byla nejdříve neutralizována kyselina a poté vysušeny horkým vzduchem a zarovnány z obou stran ostrou žiletkou. Mosazné kapiláry byly vyleptány o 6 hodin dříve, což bylo překvapivé zjištění. Pokud by byly v jedné nádobě leptány dva nebo tři kusy kapilár, doba leptání by se rapidně snížila, ale bylo by zapotřebí většího množství leptacího roztoku.



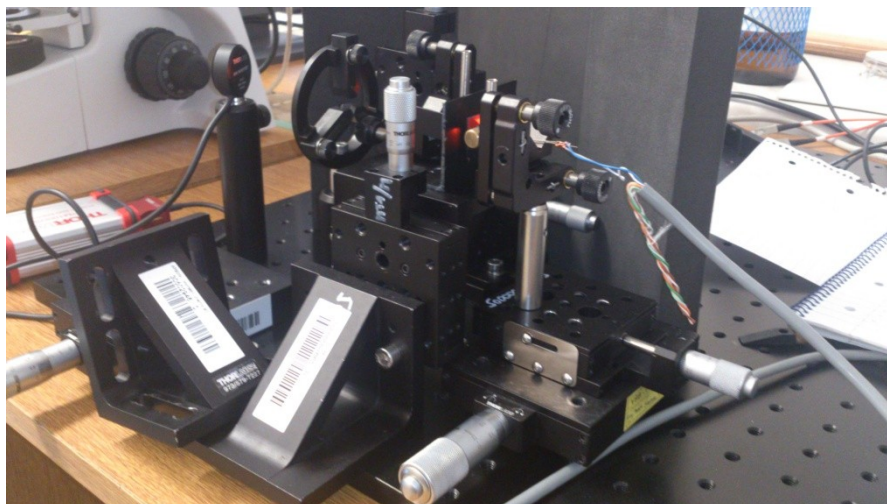
Obrázek 1.33: Uzavření a následné leptání kapilár

4.4 Popis měřicího pracoviště

4.4.1 Stavebnice Thorlabs

Základním stavebním prvkem pro uchycení LED diody, clony a optického vlnovodu byla optomechanická stavebnice firmy Thorlabs, která nabízí širokou škálu kombinací jednotlivých komponentů (Obr 1.34). Sestavené části stavebnice byly přišroubovány k pevné hliníkové podložce od stejného dodavatele.

První část sloužící k uchycení světelného zdroje je zkonstruována tak, aby byl zajištěn posun LED po ose x a z . Posun po ose y umožňuje střední část, na které je uchycena clona z nepropustného plastu s vyvrtaným otvorem o stejném průměru jako má vyrobený optický vlnovod. Třetí částí je zajištěn posun vlnovodu po všech třech osách, aby došlo co k nejpřesnější fokusaci s otvorem clony. Poslední komponentem jsou čelisti, které slouží k uchycení druhého konce vlákna.



Obrázek 1.34: Optomechanická stavebnice Thorlabs

4.4.2 Elektronické prvky

Dále bylo nutné samotný zdroj světelného záření napájet a regulovat, k tomu jsem využil laboratorní zdroj Manson NP-9625, ten ale neumožňoval přesnou kontrolu proudu protékající diodou. Pro přesnější kontrolu protékajícího proudu byl na vstupu připojen multimetr R&H HM8112-3 (Obr 1.35).

Na výstupu byl zařazen křemíkový fotodetektor Thorlabs S121C, který splňoval rozsah vlnových délek vhodných pro správnost provedených měření. Poslední komponentem byl převaděč Thorlabs Power and Energy Meter PM100USB, který byl připojen k PC s nainstalovaným softwarem Thorlabs PM100/PM200.



Obrázek 1.35: Napájení zdroje světelného záření

Parametry použitých elektronických prvků:

Laboratorní zdroj Manson NP-9625

- Výstupní napětí 0-30Vdc
- Výstupní proud 10A
- Zvlnění a šum 5mVr.m. s

Multimetr R&H HM8112-3

- Napěťový rozsah 0,1-600V
- Proudový rozsah 100 μ A-1A
- Frekvenční rozsah 1Hz-100kHz
- Přesnost 0,003%

Fotodetektor Thorlabs S121C

- Rozsah vlnových délek 400-1100nm
- Výkonový rozsah 500nW-500mW
- Odchylka měření $\pm 3\%$ (451-1000nm), $\pm 5\%$ (400-450, 1001-1100nm)

Thorlabs Power and Energy Meter PM100USB

- Rozsah vlnových délek 185nm-25 μ m
- Výkonový rozsah 100pW-200W
- Šířka pásma 100kHz

4.4.3 Použité zdroje elektromagnetického záření

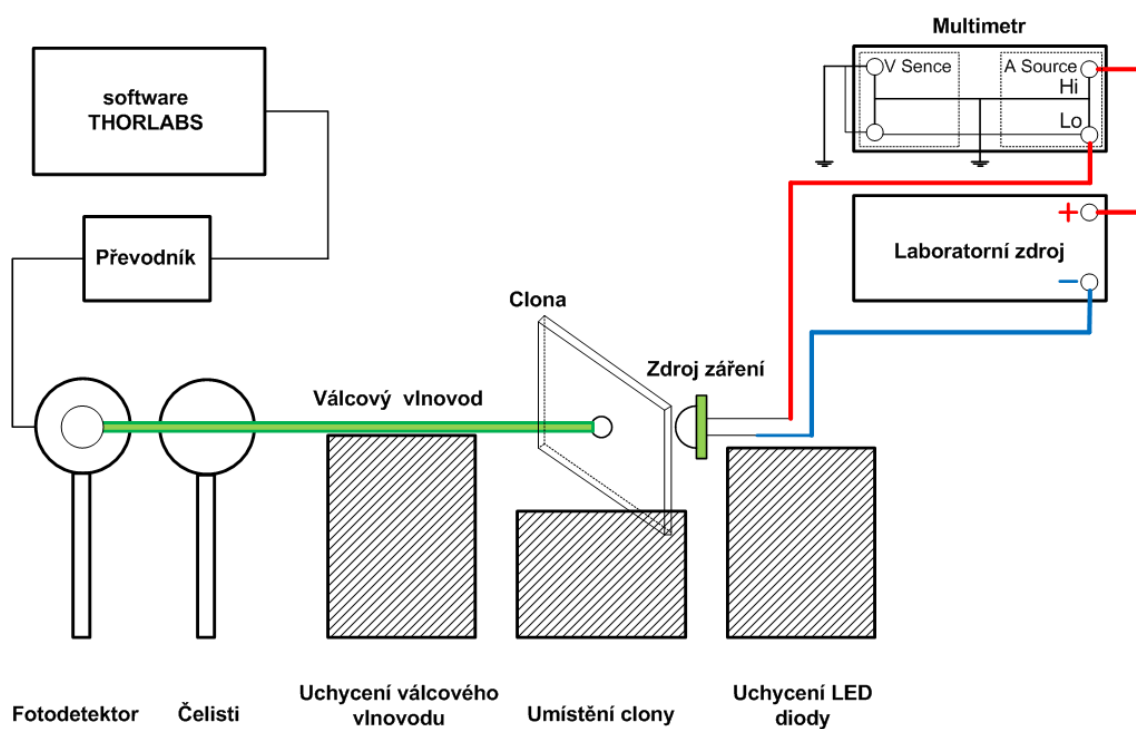
Jako zdroj světelného záření jsem využíval 5mm LED diody v rozsahu vlnových délek 400-624nm a jednu IR diodu s vlnovou délkou 880nm. IR dioda byla napájena napětím 1,7V a průchozí proud se pohyboval okolo 23mA.

Jelikož se jedná o všesměrové zdroje, volil jsem co nejmenší vyzařovací úhel diod, který činil 20°, pouze IR dioda měla vyzařovací úhel 30°, a to z důvodu malé dostupnosti nižších vyzařovacích úhlů. Kompletní seznam použitých LED diod s jejich základními parametry zobrazuje Tabulka 1.9.

Barva LED	Vlnová délka [nm]	Napětí [V]	Proud [mA]	Svítivost [mcd]
Fialová	400	3,9	25	500
Modrá	470	3,3	20	3000
Zelená	525	3,3	20	9000
Žlutá	590	2,1	20	3000
Oranžová	605	2,1	20	2200
Červená	624	2,1	20	4000

Tabulka 1.9: Seznam použitých LED

4.4.4 Kompletní schéma zapojení

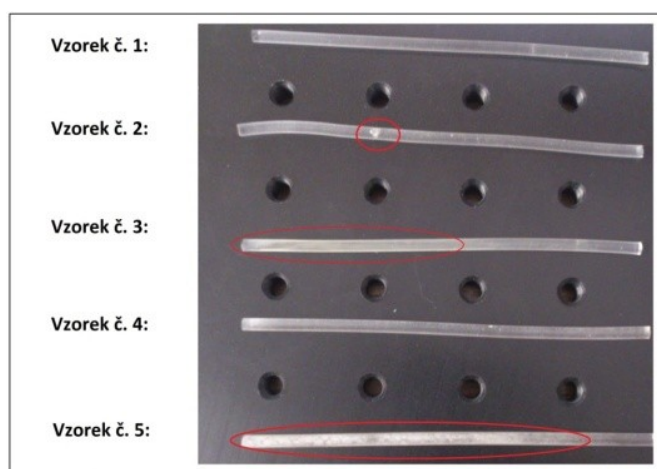


Obrázek 1.36: Schéma měřicího pracoviště

4.5 Měření útlumu

4.5.1 Označení vytvořených vlnovodů

Pro přehlednost jsem jednotlivé vlnovody (vzorky) označil čísly 1-5, viz Obr 1.37. Při vytváření jednotlivých vlnovodů pomocí metody leptání kapilár mohlo dojít k poškození samotného vlnovodu, vytvořil jsem tedy 11 vzorků, ze kterých jsem vybral 5 nejlepších, ať už z hlediska čistoty, délky nebo mechanického poškození. I přes velký počet dimenzovaných vzorků můžeme vidět menší mechanické poškození na vzorku č. 2, které bylo způsobeno špatným uchycením kapiláry v dílenském svěráku. Na vzorku č. 3 a 5 lze pozorovat znečištění povrchu způsobené samotným leptáním vlnovodu.



Obrázek 1.37: Označení vlnovodů

4.5.2 Metodika měření

Na svorky LED diody bylo nejprve přivedeno stejnosměrné napětí a laboratorním zdrojem byl pak postupně doladován procházející proud, který se zobrazoval s přesností na tři desetinná místa na displeji multimetru. Velikost nastaveného napětí zobrazoval samotný laboratorní zdroj.

Vstupní výkon byl snímán fotodetektozem umístěným těsně za clonou, tedy před vstupem do optického vlnovodu. Clona propustí pouze část energie, která je vyzářena LED diodou a zbytek energie zachytí. Následně byl fotodetektor přemístěn na výstup optického vlnovodu, kde detekoval výstupní výkon. Vstupní a výstupní výkon byl zaznamenáván pomocí softwaru Thorlabs PM100/PM200.

Co se týká samotného postupu měření, pro každý vzorek proběhlo 10 opakovaných měření v rámci jedné LED diody reprezentující určitou vlnovou délku. Aby výsledky měření byli přesné, bylo zapotřebí v softwaru Thorlabs PM100/PM200 nastavit příslušnou vlnovou délku použité diody (Obr 1.38). Měření probíhalo za konstantních podmínek.



Obrázek 1.38: Ukázka softwaru Thorlabs PM100/PM200 - fialová LED

4.5.3 Zpracování výsledků a výpočtů

Ze statistického hlediska lze nabídnout celkem 700 naměřených hodnot (6 LED a IR dioda). Získané výsledky použitých vzorků včetně grafického zpravování nalezneme v kapitolách níže. Pro lepší přehlednost jsem zpracoval jednu výslednou tabulku pro každý vzorek s průměrnými hodnotami měrného útlumu, vstupního výkonu a výstupního výkonu. Kompletní seznam naměřených hodnot je uveden v příloze diplomové práce. Samotné grafy jednotlivých vzorků taktéž zastupují průměrné hodnoty měrného útlumu v závislosti na vlnové délce. Na ukázkou uvádím souhrn všech naměřených a vypočtených hodnot vzorku č. 4 pro vlnovou délku 624nm.

Číslo měření	P_{Vst} [mW]	$P_{Výst}$ [μW]	Měrný útlum[dB/cm]
1	1,283	265,5	0,684
2	1,265	222,6	0,755
3	1,175	234,3	0,700
4	1,159	243,5	0,678
5	1,152	236,1	0,688
6	1,148	233,0	0,693
7	1,157	231,9	0,698
8	1,159	230,5	0,701
9	1,152	229,8	0,700
10	1,145	223,6	0,709
Průměrná hodnota měrného útlumu[dB/cm]			0,701

Tabulka 1.10: Naměřené a vypočtené hodnoty vzorku č. 4 - červená LED (624nm)

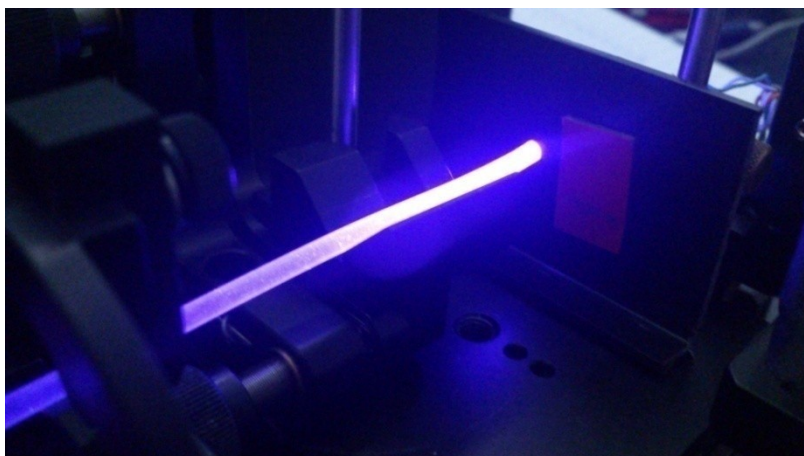
Pro dílčí vzorky (vlnové délky) byl proveden aritmetický průměr vypočtených hodnot měrných útlumů, reprezentující výsledný měrný útlum daného vzorku. Příklad výpočtu prvního měření vzorku č. 4 s použitým zdrojem záření o vlnové délce 624nm zobrazuje následující rovnice (4.5.3-1).

$$a(624\text{nm}) = -1 \cdot \log \frac{P_{V_{\text{ýst}}}}{P_{V_{\text{st}}}} = -1 \cdot \log \frac{265,5 \cdot 10^{-6}}{1,283 \cdot 10^{-3}} = 0,684\text{dB/cm} \quad (4.5.3 - 1)$$

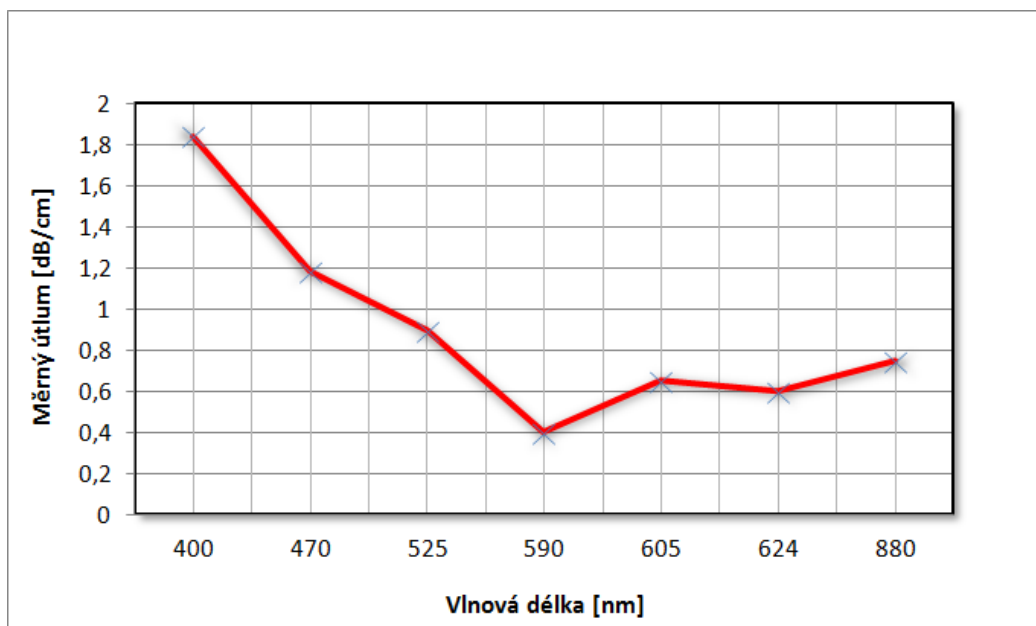
4.5.4 Spektrální závislost vzorku č. 1

Barva LED, IR	$P_{V_{\text{st}}}$ [μW]	$P_{V_{\text{st}}}$ [mW]	$P_{V_{\text{ýst}}}$ [μW]	Měrný Útlum[dB/cm]
Fialová	-	2,25	32,66	1,839
Modrá	-	1,86	121,36	1,184
Zelená	567,99	-	72,67	0,893
Žlutá	149,09	-	59,32	0,400
Oranžová	350,57	-	78,63	0,649
Červená	-	1,06	268,42	0,598
IR	-	1,03	186,16	0,745

Tabulka 1.11: Naměřené hodnoty vzorku č. 1

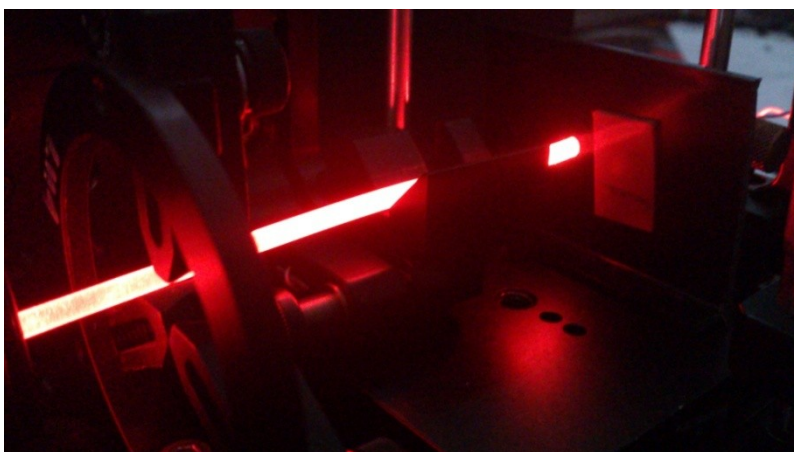


Obrázek 1.39: Ukázka měření vzorku č. 1- fialová LED (400nm)



Obrázek 1.40: Spektrální závislost útlumu vzorku č. 1

Nejvyšší hodnota útlumu byla zaznamenána na vlnové délce 400nm, která reprezentuje fialovou barvu (1,839dB/cm). Naopak nejnižší hodnotu útlumu vykazovala vlnová délka 590nm (žlutá LED) a to sice 0,4dB/cm. Útlum v rozmezí vlnových délek 400-590nm klesá a od hodnoty vlnové délky 590nm se postupně zvyšuje až na hodnotu 0,745dB/cm. Pokud budeme hovořit pouze o viditelném spektru, které reprezentují vlnové délky v rozmezí 380-750nm, tak nejnižší hodnota útlumu se nachází téměř uprostřed tohoto spektra. Mimo viditelné spektrum bylo pro srovnání použito infračervené záření s vlnovou délkou 880nm, které spadá do přenosového okna M (840-940nm). Hodnota útlumu na této vlnové délce činila 0,745dB/cm.

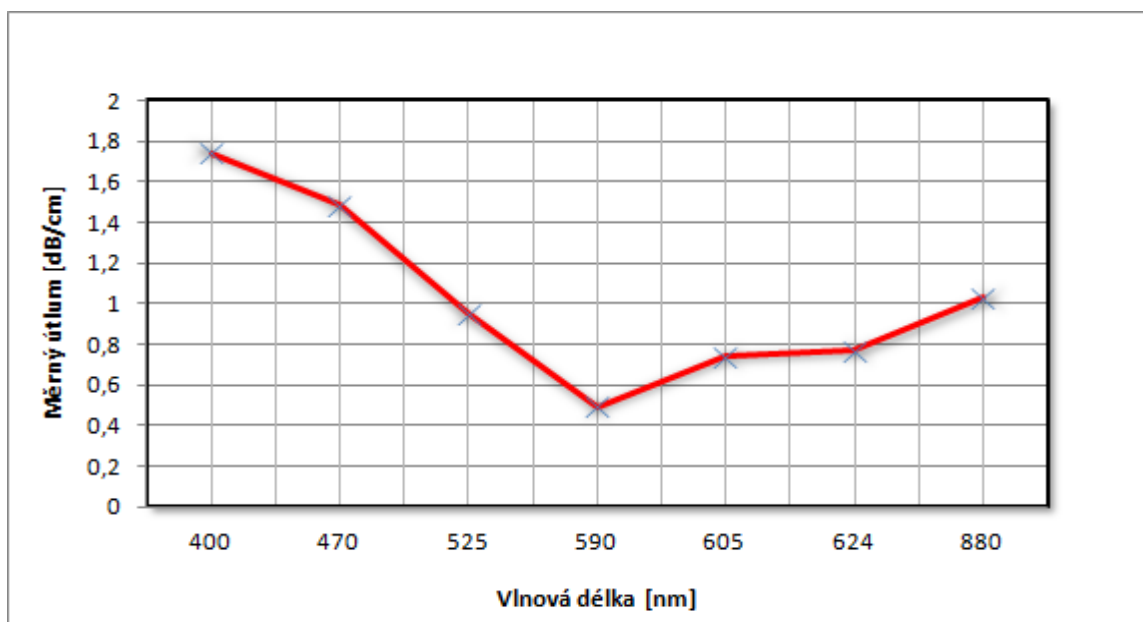


Obrázek 1.41: Ukázka měření vzorku č. 1- červená LED (624nm)

4.5.5 Spektrální závislost vzorku č. 2

Barva LED, IR	$P_{Vst} [\mu W]$	$P_{Vst} [mW]$	$P_{Výst} [\mu W]$	Měrný Útlum[dB/cm]
Fialová	-	1,67	30,13	1,743
Modrá	-	1,54	50,78	1,484
Zelená	559,30	-	62,56	0,951
Žlutá	146,01	-	46,52	0,497
Oranžová	281,18	-	50,78	0,669
Červená	-	1,05	178,81	0,770
IR	-	1,03	96,70	1,027

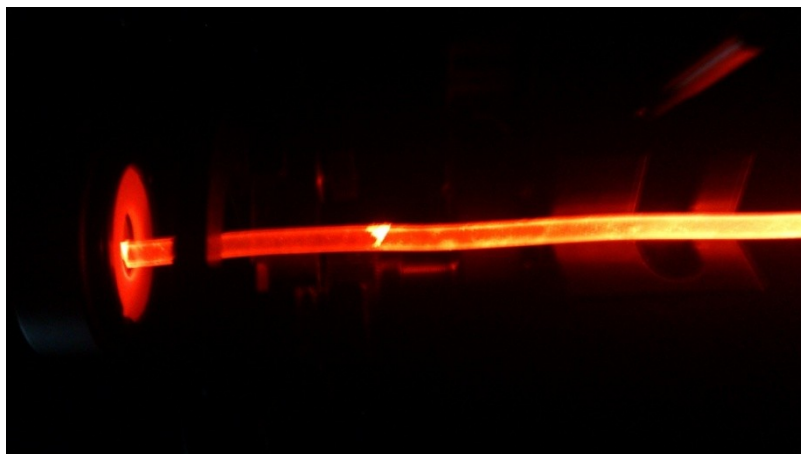
Tabulka 1.12: Naměřené hodnoty vzorku č. 2



Obrázek 1.42: Spektrální závislost útlumu vzorku č. 2

Obdobně jako u vzorku č. 1 nejnížší hodnota útlumu se nachází uprostřed viditelného spektra (0,497dB/cm) a nejvyšší hodnota na vlnové délce 400nm. V porovnání s prvním vzorkem došlo k nárůstu útlumu téměř na všech vlnových délkách s výjimkou fialové barvy.

Nárůst útlumu mohl být zapříčiněn mechanickým poškozením samotného vzorku. Mimo viditelné spektrum bylo pro srovnání použito opět infračervené záření s vlnovou délkou 880nm. Hodnota útlumu na této vlnové délce činila 1,027dB/cm.

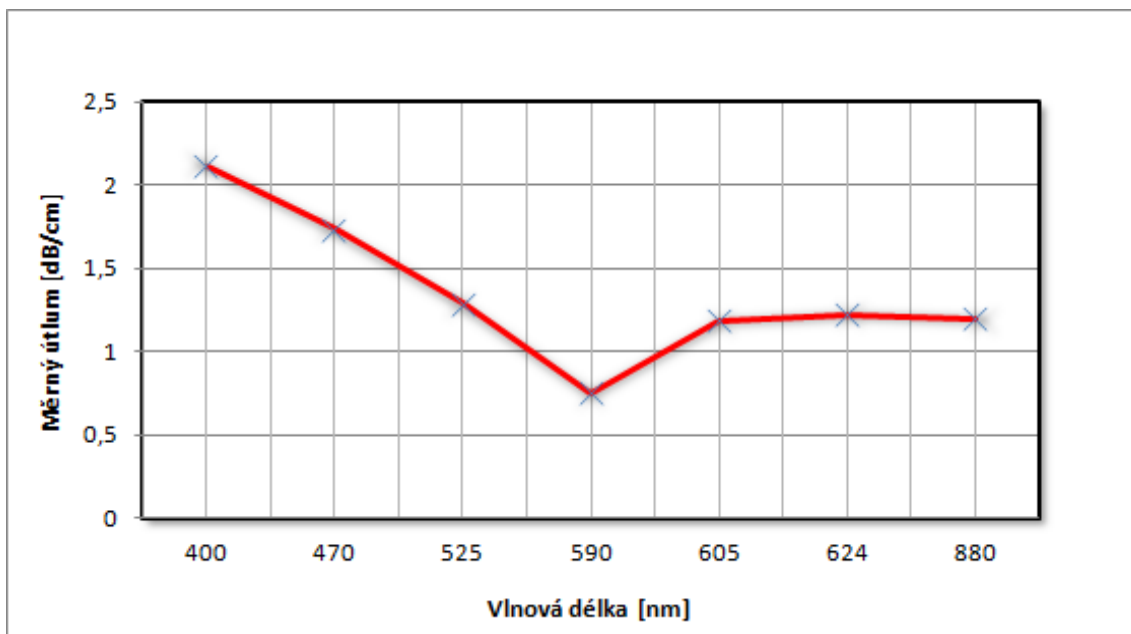


Obrázek 1.43: Ukázka měření vzorku č. 2- oranžová LED (605nm)

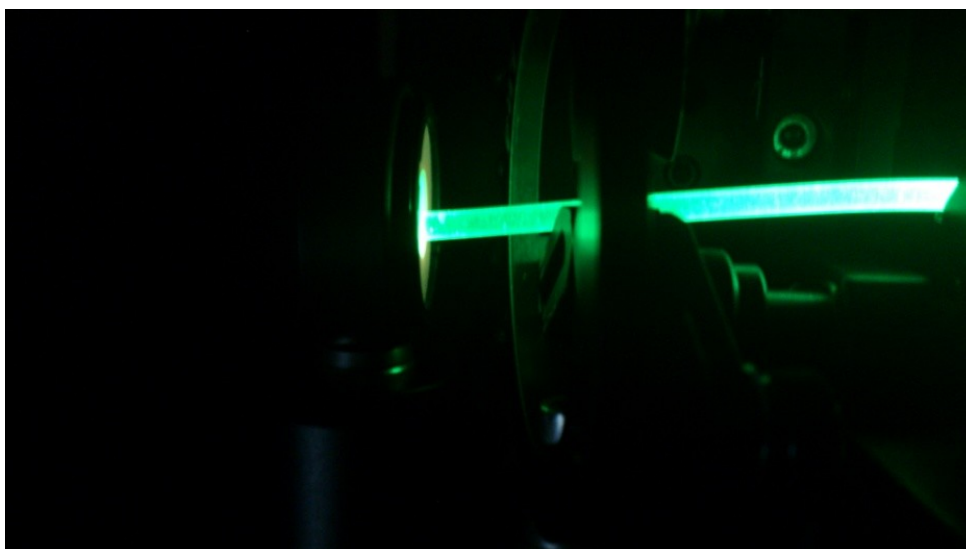
4.5.6 Spektrální závislost vzorku č. 3

Barva LED, IR	P_{Vst} [μW]	P_{Vst} [mW]	$P_{Výst}$ [μW]	Měrný Útlum[dB/cm]
Fialová	-	1,55	11,94	2,112
Modrá	-	1,58	29,59	1,728
Zelená	567,59	-	29,62	1,283
Žlutá	146,75	-	25,93	0,753
Oranžová	280,63	-	18,41	1,183
Červená	-	1,31	79,01	1,220
IR	-	1,02	65,45	1,194

Tabulka 1.13: Naměřené hodnoty vzorku č. 3

Obrázek 1.44: *Spektrální závislost útlumu vzorku č. 3*

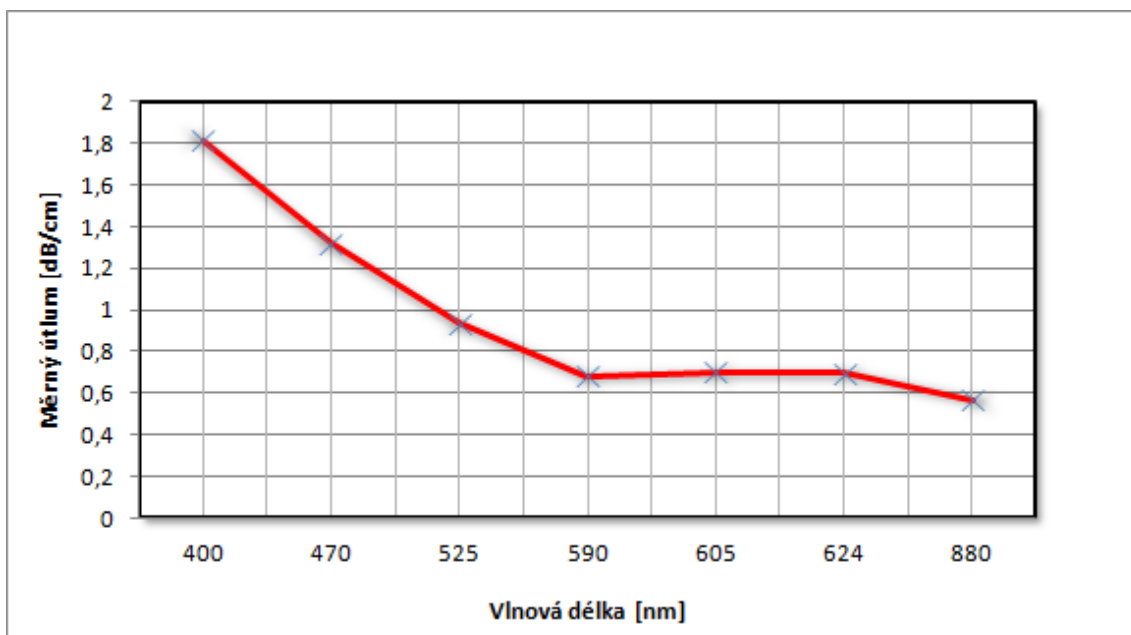
Podobně jako u vzorku č. 1 a 2 se nejnižší hodnota útlumu nachází uprostřed viditelného spektra (0,753dB/cm) a nejvyšší hodnota se nachází opět na vlnové délce 400nm a činí 2,112dB/cm. V porovnání s prvním a druhým vzorkem došlo k nárůstu útlumu na všech vlnových délkách. Nárůst útlumu byl nejspíše způsobem znečištěním optického vlnovodu. Mimo viditelné spektrum bylo pro srovnání opět použito infračervené záření s vlnovou délkou 880nm. Hodnota útlumu na této vlnové délce činila 1,194dB/cm.

Obrázek 1.45: *Ukázka měření vzorku č. 3 - zelená LED (525nm)*

4.5.7 Spektrální závislost vzorku č. 4

Barva LED, IR	P_{Vst} [μW]	P_{Vst} [mW]	$P_{Výst}$ [μW]	Měrný Útlum[dB/cm]
Fialová	-	1,67	25,26	1,820
Modrá	-	1,55	74,06	1,322
Zelená	550,44	-	63,36	0,939
Žlutá	154,24	-	31,82	0,686
Oranžová	282,59	-	56,10	0,702
Červená	-	1,18	235,08	0,701
IR	-	1,09	292,58	0,571

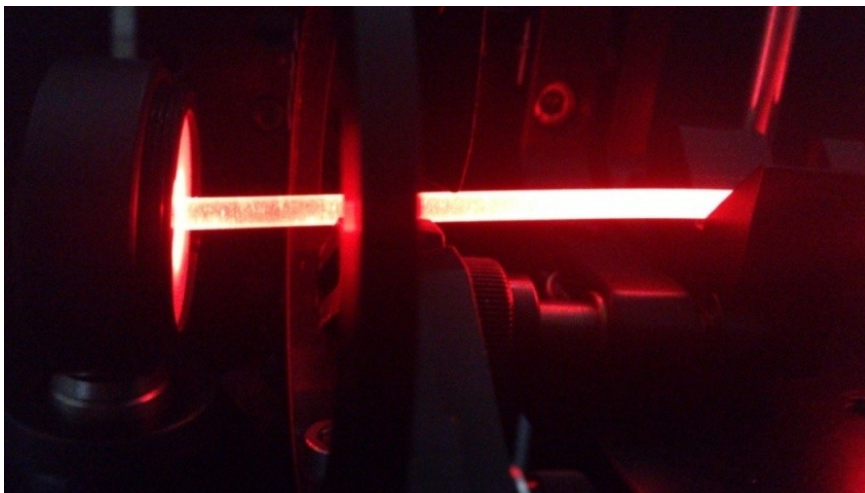
Tabulka 1.14: Naměřené hodnoty vzorku č. 4



Obrázek 1.46: Spektrální závislost útlumu vzorku č. 4

U vzorku č. 4 lze pozorovat menší hodnoty útlumu vůči předcházejícím vzorkům (vzorek č. 2 a 3). Větší podobnost můžeme vidět se vzorkem č. 1, hodnoty tohoto vzorku (č. 4) jsou jen nepatrně vyšší. Pouze infračervená dioda vykazuje nižší hodnotu útlumu téměř

o 0,2dB/cm. Mimo viditelné spektrum bylo pro srovnání opět použito infračervené záření s vlnovou délkou 880nm. Hodnota útlumu na této vlnové délce činila 0,571dB/cm. V tomto směru vykazuje vzorek č. 4 v porovnání se všemi ostatními nejmenší hodnotu útlumu na vlnové délce 880nm.

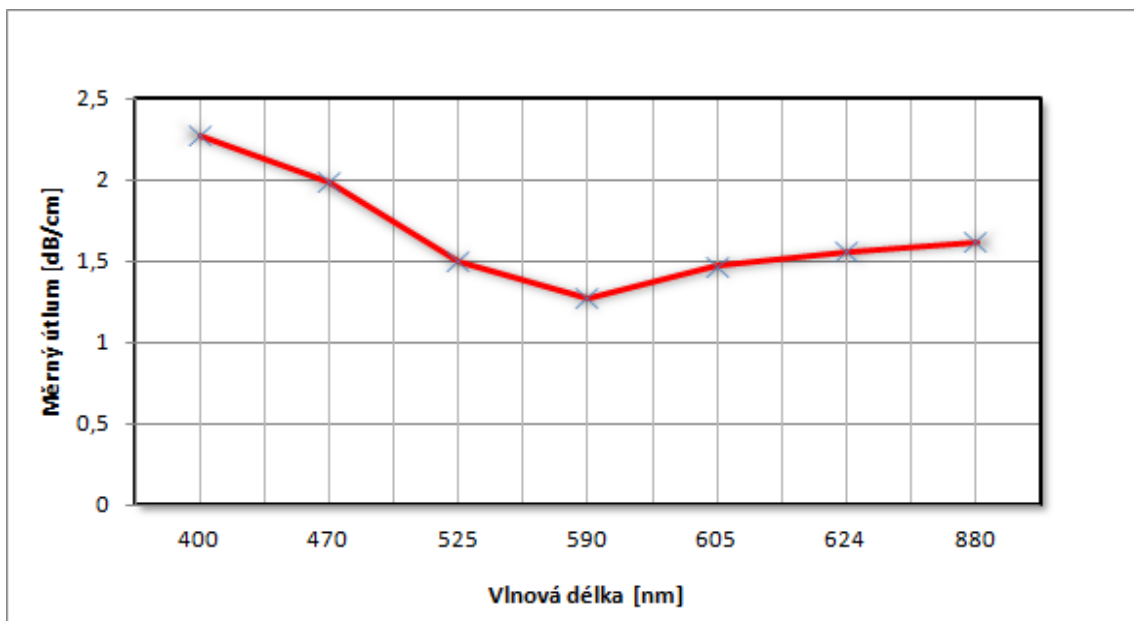


Obrázek 1.47: Ukázka měření vzorku č. 4 - červená LED (624nm)

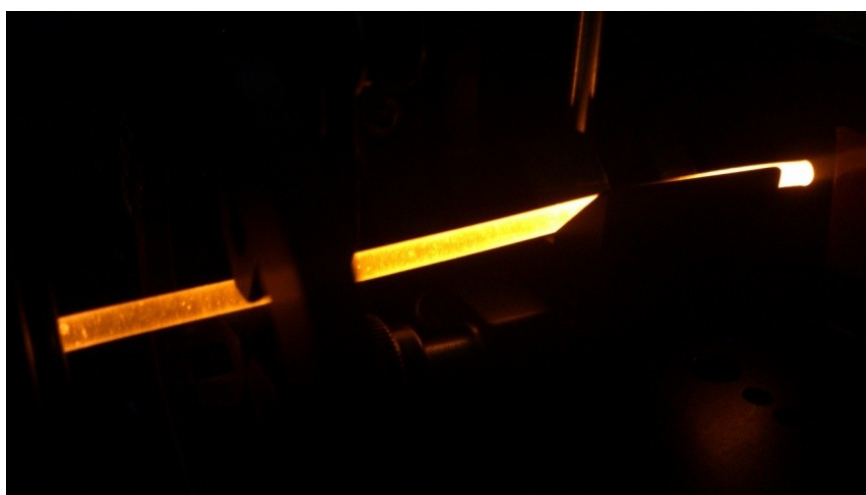
4.5.8 Spektrální závislost vzorku č. 5

Barva LED, IR	P_{Vst} [μ W]	P_{Vst} [mW]	$P_{Výst}$ [μ W]	Měrný Útlum[dB/cm]
Fialová	-	1,62	8,53	2,280
Modrá	-	1,56	15,99	1,988
Zelená	549,04	-	17,33	1,505
Žlutá	155,44	-	8,30	1,275
Oranžová	284,24	-	8,33	1,474
Červená	-	1,15	31,73	1,562
IR	-	1,08	25,86	1,622

Tabulka 1.15: Naměřené hodnoty vzorku č. 5

Obrázek 1.48: *Spektrální závislost útlumu vzorku č. 5*

U vzorku č. 5 lze pozorovat nejvyšší hodnoty útlumu vůči všem předcházejícím vzorkům. Nárůst tohoto útlumu lze přisuzovat k velké nečistotě samotného vzorku (Podkapitola 5.5.1). Jednotlivé hodnoty útlumu v závislosti na vlnové délce vykazují místy 2 až 3 násobné zhoršení hodnot vůči předcházejícím vzorkům. I v případě použití infračervené diody lze pozorovat velký nárůst útlumu např. vůči vzorku č. 4 lze pozorovat více jak trojnásobné zhoršení.

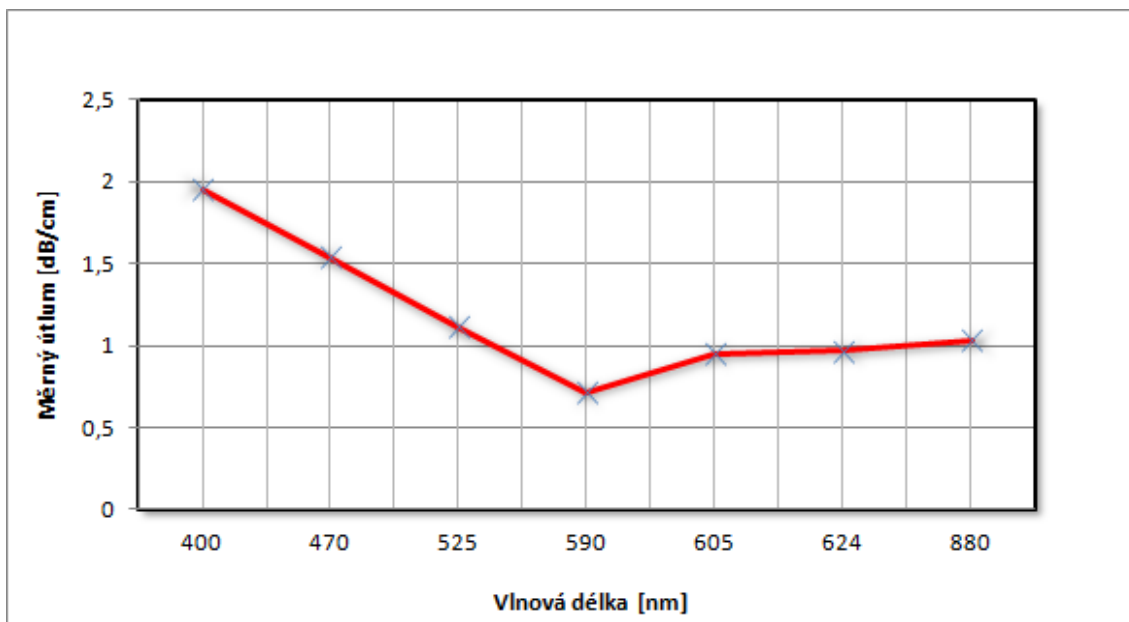
Obrázek 1.49: *Ukázka měření vzorku č. 5 - žlutá LED (590nm)*



Obrázek 1.50: Ukázka měření vzorku č. 5 - modrá LED (470nm)

4.6 Výsledná spektrální závislost útlumu

Výsledná spektrální závislost útlumu je dána aritmetickým průměrem všech vypočtených hodnot útlumu pro dílčí vzorky a vlnové délky. Nejvyšší útlum vykazovala vlnová délka 400nm (fialová LED) a naopak nejnižší útlum vlnová délka 590nm (žlutá LED). V rozmezí vlnových délek 400-590nm útlum lineárně klesá z hodnoty 1,959dB/cm na nejnižší hodnotu útlumu 0,722dB/cm a v rozmezí vlnových délek 590-880nm se postupně zvyšuje hodnota útlumu až na 1,031dB/cm (IR dioda).



Obrázek 1.51: Výsledná spektrální závislost útlumu optického vlnovodu z PDMS

Závěr

Diplomová práce se věnuje problematice zvládnutí technologických postupů realizace optických a vláknově optických prvků z organokřemičité sloučeniny s názvem polydimetylsiloxan.

V teoretickém úvodu této práce jsem se zaměřil na základní principy a jevy, na kterých je založen samotný přenos světla optickým vlnovodem a vybranému pojmu útlum respektive měrný útlum, se kterým dále pracuji v praktické části práce. Následovala kapitola s názvem polymerová vlákna, kde se blíže věnuji samotným typům těchto vláken, jejich parametrům a samotným optickým vlastnostem vláken. V závěrečných částech teoretické části práce popisují samotný polydimetylsiloxan v kombinaci s vytvrzovacím činidlem (Sylgard), využívané typy dle chemického složení a viskozity, popisují zde mechanické, elektrické a optické vlastnosti polydimetylsiloxanu a na závěr využití v možných komerčních aplikacích.

Poté, co jsem sepsal rešerši a kompletní teoretický úvod k řešené problematice, jsem se zaměřil na sepsání základních informací - úvodu do připravovaných laboratorních měření. V této části práce se věnuji popisu měřicího schéma zapojení, popisují zde jednotlivé komponenty měřicí soustavy, jejich důležitost pro zařazení a samotný základní princip funkčnosti těchto prvků.

V rámci praktické části jsem začal otestováním a následným popsáním specifikace dob vytvrzování a teploty ve vztahu na hmotnost vzorků a jejich rozměry. Vyrobil jsem si defaultní odlévací formu o pevně daných rozměrech. Dle hmotnosti vzorku se poté měnila samotná výška daného vzorku - při následném vytvrzování jsem měřil dobu průběhu vytvrzení a graficky vyhodnotil dané průběhy. S rostoucí teplotou se snižovala doba potřebná pro vytvrzení jednotlivých vzorků a s rostoucí hmotností se navyšovala doba potřebná pro vytvrzení.

Při samotné výrobě optického válcového vlnovodu jsem ze začátku využíval metodu tažení silikonového gelu (složení PDMS a vytvrzovacího činidla) od sebe. Vytvořené vzorky bohužel nedosahovaly potřebné kvality jak z pohledu nerovnoměrnosti průměru, tak samotného vytvrzení a malých deformačních změn. Využil jsem tedy metody výroby válcového vlnovodu pomocí kapiláry. Silikonový gel v potřebném poměru 10:1 jsem implementoval za pomoci bužírky s potřebným průměrem do měděných a mosazných kapilár. Poté následovalo vytvrzení za teploty 150°C po dobu asi 15 minut. Výsledné kapiláry bylo nutné vyleptat, po získání zkušeností se jevil jako nejlepší roztok na leptání kyselina chlorovodíková a peroxid vodíku v poměru 1:2. Výsledná doba leptání byla v rozmezí 40-48 hodin, mosazné kapiláry se vyleptaly o 6 hodin dříve. Ze mnou vyrobených 11 vzorků se jevilo jako 5 využitelných pro samotné měření útlumu a stanovení spektrální závislosti. Zbýlých 6 vzorků bohužel vykazovalo určité typy poškození (např. znečištění při leptání, nehomogenity), která by vnášela nežádáný útlum a negativně zkreslovala výsledné hodnoty měření.

Posledním krokem tedy bylo pomocí LED zdroje záření a jednotlivých vzorků sestavit grafy spektrální závislosti. Využíval jsem zde 5mm LED (celkem 6 barev) diody v rozsahu

vlnových délek 400-624nm a jednu IR diodu s vlnovou délkou 880nm. Každý vzorek byl testován všemi LED diodami v 10krát opakovaném měření, dle změřeného vstupního a výstupního výkonu jsem pak následně vyhodnotil měrný útlum [dB/cm] jednotlivých vorků. Výsledná spektrální závislost útlumu je dána aritmetickým průměrem všech vypočtených hodnot útlumu pro dílčí vzorky a vlnové délky. Nejvyšší útlum vykazovala vlnová délka 400nm (fialová LED) a naopak nejnižší útlum vlnová délka 590nm (žlutá LED). V rozmezí vlnových délek 400-590nm útlum lineárně klesá z hodnoty 1,959dB/cm na nejnižší hodnotu útlumu 0,722dB/cm a v rozmezí vlnových délek 590-880nm se postupně zvyšuje hodnota útlumu až na 1,031dB/cm (IR dioda). Při výsledném srovnání lze tedy pozorovat výrazně vyšší hodnoty útlumu než u standardních typů optických vláken (SiO_2) a lze též konstatovat, že i oproti polymerním vláknům vykazují výrazně horší parametry. Tuto skutečnost lze ovšem z velké části přisoudit samotnému technologickému postupu výroby a je otázkou, zda při vhodném technologickém postupu lze dosáhnout takových hodnot, kdy bude vhodné tento materiál využívat jako přenosové médium.

Použitá literatura

- [1] VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Optoelektronika: Kapitola 3. [online]. [cit. 2015-04-11]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/oks/cz/pdf/skripta_kap_3.pdf
- [2] Opton: Optical networks. [online]. [cit. 2015-04-11]. Dostupné z: <http://www.opton.cz/firmy/produkty/opticke-kabely.html>
- [3] SKAPA, Jan. VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA. Optické vláknové komunikace [online]. Ostrava, 2011 [cit. 2015-04-11]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~ska109/PSaM/06/UdKT_Opticke_vlaknove_komunikace_Skripta.pdf
- [4] DOLEČEK, Jaroslav. Moderní učebnice elektroniky 3. díl. Praha: BEN, 2005. ISBN 80-7300-184-5.
- [5] MARŠÁLEK, Leoš. VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA. Optická vlákna [online]. verze 2.1.3. 2006 [cit. 2015-04-11]. Dostupné z: <http://goro.czweb.org/download/interest/vlakna.pdf>
- [6] KUBÍK, Martin. Přenosový systém pro plastová optická vlákna. Brno, 2012. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=57440. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [7] DOLEŽAL, Ondřej. Využití POF v přístupových sítích. Brno, 2013. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=69069. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [8] BUBELA, Ondřej. Plastová optická vlákna a jejich aplikace v praxi. Brno, 2010. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=42378. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [9] FILKA, Miloslav. Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku. Vyd. 1. Brno: Centa, 2009. ISBN 978-80-86785-14-1.
- [10] BOHÁČ, Leoš. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ V PRAZE. Optické sítě [online]. Praha [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: http://data.cedupoint.cz/oppa_e-learning/2_KME/161.pdf
- [11] ČERNÁK, Igor a Michal JENČO. Telekomunikačné site IV.: Optokomunikačné systémy [online]. Liptovský Mikuláš, 2000 [cit. 2015-04-23]. ISBN 80-8040-137-3. Dostupné z: ftp://ftp.kemt.fei.tuke.sk/PristupoveSiete/_materialy/PrS_cvicenia/cvicenie5_optika/optika/telekom_siete_OAN.pdf
- [12] ČERVENKA, Dušan. Metody řešení vlivu optické disperze na stávajících optických sítích. Brno, 2011. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=39477. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.

- [13] SMRŽ, Jan. Matematická analýza a simulace přenosových parametrů optických vláken. Brno, 2012. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=56935. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [14] KUBÍK, Martin. Přenosový systém pro plastová optická vlákna. Brno, 2012. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=57440. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [15] ZIEMANN, O., J. KRAUSER, P.E. ZAMZOW a W. DAUM. POF Handbook: Optical Short Range Transmission Systems [online]. Springer, 2008 [cit. 2015-04-21]. ISBN 978-3-540-76628-5. Dostupné z: <http://www.springer.com/978-3-540-76628-5>
- [16] MITRIČ, Martin. Polymerová optická vlákna - POF. Brno, 2011. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=42629. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [17] THORLABS. Fiber Optics: Graded-Index Polymer Optical Fiber (GI-POF) [online]. [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: <http://www.thorlabs.com/catalogPages/1100.pdf>
- [18] SCHEJBALOVÁ, H., I. STIBOR, I. PROKOPOVÁ a D. LUKÁŠ. Polymerizace cyklických sloučenin (monomerů). VIII.6.2.4. 2013. Dostupné z: https://nanoed.tul.cz/pluginfile.php/1772/course/section/1044/VIII_6_2_4%20Polymerizace%20cyklickych%20sloucenin%201_12_2013.pdf
- [19] ŠTEGBAUER, Radek. Silikony v elektrotechnice. Plzeň, 2012. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/5322/DP%20Silikony%20v%20elektrotechnice%20Radek%20Stegbauer.pdf?sequence=1>. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [20] Fyzikové vyvinuli průhlednou baterii: PDMS. [online]. s. 1 [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: <http://www.techmagazin.cz/270>
- [21] Twenty-Four-Hour Intraocular Pressure Related Changes Following Adjuvant Selective Laser Trabeculoplasty for Normal Tension Glaucoma: PDMS. [online]. [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: <http://www.sensimed.ch/en/>
- [22] Smart Contact Lenses: PDMS. [online]. s. 1 [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: http://news.ucdavis.edu/search/news_detail.lasso?id=8722

Seznam příloh

Příloha A:Naměřené a vypočtené hodnoty všech vzorků - vlnová délka 400nm	I
Příloha B:Naměřené a vypočtené hodnoty všech vzorků - vlnová délka 470nm.....	IV
Příloha C:Naměřené a vypočtené hodnoty všech vzorků - vlnová délka 525nm.....	vii
Příloha D:Naměřené a vypočtené hodnoty všech vzorků - vlnová délka 590nm	x
Příloha E:Naměřené a vypočtené hodnoty všech vzorků - vlnová délka 605nm.....	xiii
Příloha F:Naměřené a vypočtené hodnoty všech vzorků - vlnová délka 624nm	xvi
Příloha G:Naměřené a vypočtené hodnoty všech vzorků - vlnová délka 880nm	xix
Příloha H:Průměrné hodnoty měrného útlumu všech vzorků	xxii

Vzorek č. 1			
Číslo měření	P_{Vst} [mW]	$P_{Výst}$ [μW]	Měrný útlum [dB/cm]
1	2,24	32,69	1,836
2	2,28	32,55	1,845
3	2,25	32,81	1,836
4	2,18	32,52	1,826
5	2,31	32,83	1,847
6	2,28	32,59	1,845
7	2,23	32,69	1,834
8	2,25	32,64	1,838
9	2,25	32,63	1,839
10	2,26	32,67	1,840
Průměrná hodnota měrného útlumu [dB/cm]			1,839

Vzorek č. 2			
Číslo měření	P_{Vst} [mW]	$P_{Výst}$ [μW]	Měrný útlum [dB/cm]
1	1,682	30,34	1,744
2	1,663	30,18	1,741
3	1,658	30,10	1,741
4	1,669	30,21	1,742
5	1,675	30,25	1,743
6	1,679	30,12	1,746
7	1,683	30,03	1,749
8	1,655	30,06	1,741
9	1,658	30,02	1,742
10	1,642	29,97	1,739
Průměrná hodnota měrného útlumu [dB/cm]			1,743

Vzorek č. 3			
Číslo měření	P_{Vst} [mW]	$P_{Výst}$ [μW]	Měrný útlum [dB/cm]
1	1,562	12,01	2,114
2	1,548	11,78	2,119
3	1,556	11,94	2,115
4	1,546	11,62	2,124
5	1,502	12,10	2,094
6	1,559	12,08	2,111
7	1,548	12,13	2,106
8	1,566	12,21	2,108
9	1,539	11,72	2,118
10	1,536	11,78	2,115
Průměrná hodnota měrného útlumu [dB/cm]			2,112

Vzorek č. 4			
Číslo měření	P_{Vst} [mW]	$P_{Výst}$ [μW]	Měrný útlum [dB/cm]
1	1,712	25,04	1,835
2	1,663	25,12	1,821
3	1,658	25,16	1,819
4	1,669	24,96	1,825
5	1,675	25,33	1,820
6	1,679	25,38	1,821
7	1,683	25,42	1,821
8	1,655	25,12	1,819
9	1,658	25,24	1,817
10	1,642	25,86	1,803
Průměrná hodnota měrného útlumu [dB/cm]			1,820

Vzorek č. 5			
Číslo měření	P_{Vst} [mW]	$P_{Výst}$ [μW]	Měrný útlum [dB/cm]
1	1,621	8,558	2,277
2	1,622	8,555	2,278
3	1,625	8,261	2,294
4	1,622	8,559	2,278
5	1,621	8,556	2,278
6	1,625	8,566	2,278
7	1,628	8,57	2,279
8	1,626	8,568	2,278
9	1,625	8,552	2,279
10	1,621	8,549	2,278
Průměrná hodnota měrného útlumu [dB/cm]			2,280

Vzorek č. 1			
Číslo měření	P_{Vst} [mW]	P_{Vyst} [μW]	Měrný útlum [dB/cm]
1	1,851	121,6	1,182
2	1,849	121,8	1,181
3	1,855	121,5	1,184
4	1,856	121,5	1,184
5	1,859	120,9	1,187
6	1,855	121,6	1,183
7	1,853	121,9	1,182
8	1,861	120,6	1,188
9	1,859	120,9	1,187
10	1,856	121,3	1,185
Průměrná hodnota měrného útlumu [dB/cm]			1,184

Vzorek č. 2			
Číslo měření	P_{Vst} [mW]	P_{Vyst} [μW]	Měrný útlum [dB/cm]
1	1,540	43,2	1,552
2	1,553	43,3	1,555
3	1,533	55,1	1,444
4	1,549	52,3	1,472
5	1,525	53,1	1,458
6	1,551	54,3	1,456
7	1,540	52,6	1,467
8	1,535	49,8	1,489
9	1,552	51,9	1,476
10	1,548	52,2	1,472
Průměrná hodnota měrného útlumu [dB/cm]			1,484

Vzorek č. 3			
Číslo měření	P_{Vst} [mW]	$P_{Výst}$ [μW]	Měrný útlum [dB/cm]
1	1,556	27,6	1,751
2	1,572	30,2	1,716
3	1,575	31,8	1,695
4	1,577	30,9	1,708
5	1,592	28,3	1,750
6	1,601	28,6	1,748
7	1,580	30,1	1,720
8	1,590	29,7	1,729
9	1,572	28,5	1,742
10	1,589	30,2	1,721
Průměrná hodnota měrného útlumu [dB/cm]			1,728

Vzorek č. 4			
Číslo měření	P_{Vst} [mW]	$P_{Výst}$ [μW]	Měrný útlum [dB/cm]
1	1,550	75,1	1,315
2	1,556	78,3	1,298
3	1,559	75,3	1,316
4	1,556	78,4	1,298
5	1,554	70,9	1,341
6	1,552	72,8	1,329
7	1,555	72,9	1,329
8	1,556	77,9	1,300
9	1,548	70,1	1,344
10	1,545	68,9	1,351
Průměrná hodnota měrného útlumu [dB/cm]			1,322

Vzorek č. 5			
Číslo měření	P_{Vst} [mW]	$P_{Výst}$ [μW]	Měrný útlum [dB/cm]
1	1,560	16,5	1,976
2	1,553	17,1	1,958
3	1,552	15,5	2,001
4	1,56	16,2	1,984
5	1,549	15,3	2,005
6	1,550	15,5	2,000
7	1,562	16,8	1,968
8	1,559	16,2	1,983
9	1,554	15,2	2,010
10	1,556	15,6	1,999
Průměrná hodnota měrného útlumu [dB/cm]			1,998

Příloha C: *Naměřené a vypočtené hodnoty všech vzorků - vlnová délka 525nm*

Vzorek č. 1			
Číslo měření	P_{Vst} [μW]	$P_{Výst}$ [μW]	Měrný útlum [dB/cm]
1	574,0	73,76	0,891
2	563,2	74,32	0,880
3	561,8	70,12	0,904
4	560,1	69,15	0,908
5	568,2	72,51	0,894
6	568,3	74,55	0,882
7	569,9	73,48	0,890
8	571,2	70,58	0,908
9	573,4	73,31	0,893
10	569,8	74,89	0,881
Průměrná hodnota měrného útlumu [dB/cm]			0,839

Vzorek č. 2			
Číslo měření	P_{Vst} [μW]	$P_{Výst}$ [μW]	Měrný útlum [dB/cm]
1	560,3	63,2	0,948
2	560,5	63,8	0,944
3	559,8	64,1	0,941
4	561,0	63,9	0,943
5	558,3	61,5	0,958
6	558,8	62,8	0,949
7	559,6	61,3	0,960
8	559,4	61,6	0,958
9	557,4	61,1	0,960
10	558,2	62,3	0,952
Průměrná hodnota měrného útlumu [dB/cm]			0,951

Vzorek č. 3			
Číslo měření	P_{Vst} [μW]	$P_{Výst}$ [μW]	Měrný útlum [dB/cm]
1	571,2	34,2	1,223
2	566,9	28,8	1,294
3	564,1	29,4	1,283
4	568,4	30,5	1,270
5	568,7	31,3	1,259
6	569,3	28,2	1,305
7	567,9	28,2	1,304
8	566,5	28,3	1,301
9	568,4	28,2	1,304
10	564,5	29,1	1,288
Průměrná hodnota měrného útlumu [dB/cm]			1,283

Vzorek č. 4			
Číslo měření	P_{Vst} [μW]	$P_{Výst}$ [μW]	Měrný útlum [dB/cm]
1	552,8	60,12	0,964
2	547,4	63,25	0,937
3	548,5	64,31	0,931
4	547,8	63,13	0,938
5	547,9	63,82	0,934
6	553,2	62,19	0,949
7	552,6	64,77	0,931
8	551,8	64,91	0,929
9	548,1	63,86	0,934
10	554,3	63,25	0,943
Průměrná hodnota měrného útlumu [dB/cm]			0,939

Vzorek č. 5			
Číslo měření	P_{Vst} [μW]	$P_{Výst}$ [μW]	Měrný útlum [dB/cm]
1	550,1	16,32	1,528
2	549,2	25,48	1,334
3	548,8	15,35	1,553
4	549,8	16,37	1,526
5	549,7	16,81	1,515
6	547,3	17,94	1,484
7	548,4	16,45	1,523
8	547,2	16,88	1,511
9	548,7	15,96	1,536
10	551,2	15,71	1,545
Průměrná hodnota měrného útlumu [dB/cm]			1,505

Příloha D: *Naměřené a vypočtené hodnoty všech vzorků - vlnová délka 590nm*

Vzorek č. 1			
Číslo měření	P_{Vst} [μW]	$P_{Výst}$ [μW]	Měrný útlum [dB/cm]
1	150,7	62,54	0,382
2	149,8	59,33	0,402
3	148,8	60,96	0,388
4	147,3	61,21	0,381
5	148,4	57,37	0,413
6	149,2	57,45	0,414
7	149,9	58,57	0,408
8	150,5	60,12	0,399
9	148,1	56,94	0,415
10	148,2	58,69	0,402
Průměrná hodnota měrného útlumu [dB/cm]			0,400

Vzorek č. 2			
Číslo měření	P_{Vst} [μW]	$P_{Výst}$ [μW]	Měrný útlum [dB/cm]
1	146,5	44,21	0,520
2	146,2	49,19	0,473
3	146,5	49,28	0,473
4	145,9	49,00	0,474
5	145,9	44,35	0,517
6	146,5	44,52	0,517
7	146,3	44,48	0,517
8	144,7	46,58	0,492
9	145,9	46,77	0,494
10	145,7	46,82	0,493
Průměrná hodnota měrného útlumu [dB/cm]			0,497

Vzorek č. 3			
Číslo měření	P_{Vst} [μW]	$P_{Výst}$ [μW]	Měrný útlum [dB/cm]
1	147,9	26,94	0,740
2	147,0	25,45	0,762
3	147,3	25,82	0,756
4	147,4	26,52	0,745
5	147,5	25,24	0,767
6	148,0	25,69	0,760
7	146,8	25,78	0,755
8	145,7	26,14	0,746
9	145,6	25,89	0,750
10	144,3	25,83	0,747
Průměrná hodnota měrného útlumu [dB/cm]			0,753

Vzorek č. 4			
Číslo měření	P_{Vst} [μW]	$P_{Výst}$ [μW]	Měrný útlum [dB/cm]
1	153,3	32,65	0,672
2	157,7	30,15	0,719
3	154	31,18	0,694
4	158,5	32,39	0,690
5	156,5	29,95	0,718
6	155,8	33,94	0,662
7	154,3	29,78	0,714
8	149,9	32,65	0,662
9	150,2	32,52	0,665
10	152,2	32,96	0,664
Průměrná hodnota měrného útlumu [dB/cm]			0,686

Vzorek č. 5			
Číslo měření	P_{Vst} [μW]	$P_{Výst}$ [μW]	Měrný útlum [dB/cm]
1	156,5	10,2	1,186
2	151,2	8,6	1,245
3	150,4	7,1	1,326
4	155,6	7,3	1,329
5	155,7	8,1	1,284
6	156,9	8,2	1,282
7	157,0	7,6	1,315
8	156,8	7,7	1,309
9	157,8	9	1,244
10	156,5	9,2	1,231
Průměrná hodnota měrného útlumu [dB/cm]			1,275

Příloha E: *Naměřené a vypočtené hodnoty všech vzorků - vlnová délka 605nm*

Vzorek č. 1			
Číslo měření	P_{Vst} [μW]	$P_{Výst}$ [μW]	Měrný útlum [dB/cm]
1	349,9	80,47	0,638
2	350,3	78,59	0,649
3	349,7	78,63	0,648
4	354,2	78,45	0,655
5	350,2	77,36	0,656
6	350,1	78,45	0,650
7	350,2	77,78	0,653
8	350,2	78,86	0,647
9	350,5	78,9	0,648
10	350,4	78,83	0,648
Průměrná hodnota měrného útlumu [dB/cm]			0,649

Vzorek č. 2			
Číslo měření	P_{Vst} [μW]	$P_{Výst}$ [μW]	Měrný útlum [dB/cm]
1	281,2	50,83	0,743
2	281,1	50,74	0,744
3	281,4	50,86	0,743
4	281,5	50,75	0,744
5	280,4	50,82	0,742
6	281,5	50,77	0,744
7	280,3	50,88	0,741
8	280,1	50,71	0,742
9	282,8	50,67	0,747
10	281,5	50,74	0,744
Průměrná hodnota měrného útlumu [dB/cm]			0,747

Vzorek č. 3			
Číslo měření	P_{Vst} [μW]	$P_{Výst}$ [μW]	Měrný útlum [dB/cm]
1	280,6	18,36	1,184
2	280,4	18,43	1,182
3	281,3	18,31	1,186
4	280,5	18,40	1,183
5	280,9	18,46	1,182
6	279,9	18,53	1,179
7	279,5	18,48	1,180
8	280,0	18,55	1,179
9	281,8	18,27	1,188
10	281,4	18,26	1,188
Průměrná hodnota měrného útlumu [dB/cm]			1,183

Vzorek č. 4			
Číslo měření	P_{Vst} [μW]	$P_{Výst}$ [μW]	Měrný útlum [dB/cm]
1	282,3	55,88	0,703
2	282,8	55,53	0,707
3	282,1	55,69	0,705
4	283,4	56,14	0,703
5	281,9	55,23	0,708
6	282,3	56,11	0,702
7	283,2	56,40	0,701
8	282,9	56,64	0,699
9	282,6	56,58	0,699
10	282,4	56,78	0,697
Průměrná hodnota měrného útlumu [dB/cm]			0,702

Vzorek č. 5			
Číslo měření	P_{Vst} [μW]	$P_{Výst}$ [μW]	Měrný útlum [dB/cm]
1	248,3	8,325	1,475
2	248,2	8,336	1,474
3	248,3	8,328	1,474
4	248,5	8,322	1,475
5	247,5	8,356	1,472
6	247,8	8,354	1,472
7	248,2	8,340	1,474
8	248,2	8,325	1,474
9	248,9	8,321	1,476
10	248,5	8,328	1,475
Průměrná hodnota měrného útlumu [dB/cm]			1,474

Příloha F: *Naměřené a vypočtené hodnoty všech vzorků - vlnová délka 624nm*

Vzorek č. 1			
Číslo měření	P_{Vst} [mW]	$P_{Výst}$ [μW]	Měrný útlum [dB/cm]
1	1,068	277,3	0,586
2	1,029	274,0	0,575
3	1,066	217,9	0,689
4	1,074	273,9	0,593
5	1,070	272,1	0,595
6	1,069	275,5	0,589
7	1,055	271,8	0,589
8	1,050	271,5	0,587
9	1,059	273,4	0,588
10	1,063	276,8	0,584
Průměrná hodnota měrného útlumu [dB/cm]			0,598

Vzorek č. 2			
Číslo měření	P_{Vst} [mW]	$P_{Výst}$ [μW]	Měrný útlum [dB/cm]
1	1,074	180,1	0,775
2	1,045	174,5	0,777
3	1,055	176,9	0,776
4	1,059	178,0	0,774
5	1,064	189,2	0,750
6	1,048	173,0	0,782
7	1,043	172,6	0,781
8	1,058	177,5	0,775
9	1,052	174,8	0,779
10	1,021	191,5	0,727
Průměrná hodnota měrného útlumu [dB/cm]			0,770

Vzorek č. 3			
Číslo měření	P_{Vst} [mW]	$P_{Výst}$ [μW]	Měrný útlum [dB/cm]
1	1,294	83,6	1,190
2	1,299	82,5	1,197
3	1,302	80,5	1,209
4	1,292	79,9	1,209
5	1,325	68,9	1,284
6	1,315	78,5	1,224
7	1,324	79,6	1,221
8	1,310	78,9	1,220
9	1,309	84,5	1,190
10	1,330	73,2	1,259
Průměrná hodnota měrného útlumu [dB/cm]			1,220

Vzorek č. 4			
Číslo měření	P_{Vst} [mW]	$P_{Výst}$ [μW]	Měrný útlum [dB/cm]
1	1,283	265,5	0,684
2	1,265	222,6	0,755
3	1,175	234,3	0,700
4	1,159	243,5	0,678
5	1,152	236,1	0,688
6	1,148	233	0,693
7	1,157	231,9	0,698
8	1,159	230,5	0,701
9	1,152	229,8	0,700
10	1,145	223,6	0,709
Průměrná hodnota měrného útlumu [dB/cm]			0,701

Vzorek č. 5			
Číslo měření	P_{Vst} [mW]	$P_{Výst}$ [μW]	Měrný útlum [dB/cm]
1	1,159	33,3	1,542
2	1,162	32,1	1,559
3	1,157	35,9	1,508
4	1,152	31,5	1,563
5	1,149	30,1	1,582
6	1,155	28	1,615
7	1,142	27,8	1,614
8	1,148	29,7	1,587
9	1,155	34,4	1,526
10	1,159	34,5	1,526
Průměrná hodnota měrného útlumu [dB/cm]			1,562

Příloha G: *Naměřené a vypočtené hodnoty všech vzorků - vlnová délka 880nm*

Vzorek č. 1			
Číslo měření	P_{Vst} [mW]	$P_{Výst}$ [μW]	Měrný útlum [dB/cm]
1	1,029	186,3	0,742
2	1,031	185,8	0,744
3	1,025	186,5	0,740
4	1,022	186,7	0,738
5	1,034	185,8	0,745
6	1,031	185,6	0,745
7	1,025	186,5	0,740
8	1,028	186,4	0,742
9	1,024	186,5	0,740
10	1,032	185,5	0,745
Průměrná hodnota měrného útlumu [dB/cm]			0,742

Vzorek č. 2			
Číslo měření	P_{Vst} [mW]	$P_{Výst}$ [μW]	Měrný útlum [dB/cm]
1	1,029	99,6	1,014
2	1,031	99,3	1,016
3	1,025	97,8	1,020
4	1,024	94,9	1,033
5	1,035	94,8	1,038
6	1,036	98,8	1,021
7	1,034	95,1	1,036
8	1,028	97,5	1,023
9	1,023	94,5	1,034
10	1,025	94,7	1,034
Průměrná hodnota měrného útlumu [dB/cm]			1,027

Vzorek č. 3			
Číslo měření	P_{Vst} [mW]	$P_{Výst}$ [μW]	Měrný útlum [dB/cm]
1	1,023	64,3	1,202
2	1,023	65,1	1,196
3	1,018	64,1	1,201
4	1,026	65,3	1,196
5	1,022	68,1	1,176
6	1,023	65,2	1,196
7	1,022	65,6	1,193
8	1,028	65,6	1,195
9	1,022	66,1	1,189
10	1,019	65,1	1,195
Průměrná hodnota měrného útlumu [dB/cm]			1,194

Vzorek č. 4			
Číslo měření	P_{Vst} [mW]	$P_{Výst}$ [μW]	Měrný útlum [dB/cm]
1	1,091	292,5	0,572
2	1,087	291,2	0,572
3	1,092	292,3	0,572
4	1,089	293,3	0,570
5	1,092	293,0	0,571
6	1,085	292,8	0,569
7	1,082	291,5	0,570
8	1,096	293,8	0,572
9	1,085	294,2	0,567
10	1,086	291,2	0,572
Průměrná hodnota měrného útlumu [dB/cm]			0,571

Vzorek č. 5			
Číslo měření	P_{Vst} [mW]	$P_{Výst}$ [μW]	Měrný útlum [dB/cm]
1	1,086	25,856	1,623
2	1,085	25,860	1,623
3	1,086	25,852	1,623
4	1,083	25,853	1,622
5	1,088	25,864	1,624
6	1,089	25,863	1,624
7	1,082	25,858	1,622
8	1,076	25,865	1,619
9	1,078	25,864	1,620
10	1,072	25,870	1,617
Průměrná hodnota měrného útlumu [dB/cm]			1,622

Příloha H: *Průměrné hodnoty měrného útlumu všech vzorků*

Průměrné hodnoty měrného útlumu [dB/cm]						
λ [nm]	Vz. č. 1	Vz. č. 2	Vz. č. 3	Vz. č. 4	Vz. č. 5	Celkový
400	1,839	1,743	2,112	1,820	2,280	1,959
470	1,184	1,484	1,728	1,322	1,988	1,541
525	0,893	0,951	1,283	0,939	1,505	1,114
590	0,400	0,497	0,753	0,686	1,275	0,722
605	0,649	0,743	1,183	0,702	1,474	0,950
624	0,598	0,770	1,220	0,701	1,562	0,970
880	0,742	1,027	1,194	0,571	1,622	1,031